

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

Análisis de crash-box con materiales compuestos

MEMORIA

Autor:	Jordi Urcola Peya
Director (UPC):	Francesc Roure Fernandez
Director (Empresa):	Óscar Roderó Benedicte
Convocatoria:	Enero 2020

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Introducción al DEFO o fusible mecánico.....	5
2.2 Situación y objetivos del proyecto	6
2. ENSAYOS A BAJA VELOCIDAD (RCAR).....	7
2.1 Funcionamiento	8
2.2 Elementos principales: CMS (Crash Management System)	8
2.3 RCAR Bumper Test	10
2.4. RCAR AZT	11
2.5. Wall	12
2.6. Péndulos.....	13
3. ESTADO DEL ARTE	15
3.1. Conceptos generales del entorno del DEFO.....	15
3.2. Características y objetivos del DEFO	15
3.2.1 Intrusión	16
3.2.2 Desplazamientos larguero.....	17
3.2.3 Fuerzas de sección y fuerzas pico (PCF)	17
3.2.4 Eficiencia de fuerzas de aplastamiento (CFE).....	18
3.2.5 Energía absorbida por unidad de masa (SEA)	18
3.2.6. Modos de fallo de la sección	18
3.3. Clasificación.....	21
3.3.1. Según técnicas de unión y geometría	21
3.3.2. Clasificación según número de células.....	22
3.3.3. Según material	22
3.3.4. Según crash beads.....	23
3.4 Apuntes sobre el estado del arte	24
4. MATERIALES COMPUESTOS	25
4.1 Definición y características.....	25
4.2 Estructura	26
4.3 Tipos	26
4.4 Fallo de compuestos laminados.....	28
4.5 Compuestos en automoción	29
5. ENSAYO DE LAS PROBETAS.....	31
5.1 Ensayo a tracción.....	31
6. ESI GROUP - PAMCRASH: Metodología de simulaciones numérica.....	35

6.1 Información adicional funcionamiento interno de Pam-Crash.....	35
6.2 Análisis explícito	35
7. FUNCIONAMIENTO DE LOS MODELOS.....	36
7.1 GROUPS o Sets	36
7.2 PROPERTY	36
7.3 Constraints	36
7.3.1 Contactos.....	37
7.3.2 RBODY (Rigidbody)	37
7.4 Load.....	37
7.4.1 Boundary	38
7.4.2 Initial velocity	38
7.5 PLY	38
7.6 LANZADOR.....	38
7.7 Materiales compuestos.....	39
8. SIMULACIONES.....	40
8.1 Geometría	40
8.2 Mallado	40
8.3 Modelización	42
8.3.1 Properties, PLY y materiales.....	42
8.3.2 Defo e impactómetro	43
8.4 Objetivo	43
8.5 ENSAYOS.....	44
8.5.1 GRÁFICAS.....	44
8.5.2 3 Zonas diferentes de laminado	48
8.5.3 Grosor homogéneo	49
8.5.4 Otros.....	51
8.5.5 Acero	52
9. RESULTADOS	53
10. CONCLUSIONES	54

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se ha desarrollado en el seno de la empresa Solute S.L. durante un periodo en cual el autor del mismo trabajaba en la citada empresa, dentro del departamento de análisis mecánico y estructural. Solute S.L. se dedica a la simulación numérica en sectores de la ingeniería, tales como aeronáutica, civil, energética, ferroviaria y automotriz. Entre los estudios más habituales se encuentran los ensayos de impacto de vehículos, análisis estáticos, análisis dinámico y de fatiga mediante técnicas de elementos finitos. Así mismo Solute S.L. desarrolla y comercializa un software propio de estudio de recurso eólico.

1.1. Introducción al DEFO o fusible mecánico

Un fusible mecánico es un dispositivo de protección de sistemas en los que se hallan involucrados componentes mecánicos. Es decir, si el sistema mecánico falla, el fusible se encarga de recibir todo el daño con el objetivo de dejar intacto el resto de elementos que configuran el sistema. Este elemento se puede encontrar en muchos tipos de sistemas mecánicos, pero en este proyecto será de importancia el fusible mecánico en la automoción.

Un DEFO, conocido como Crash-Box o Crash-can en inglés, es un componente de gestión de impacto a baja velocidad, concebible como un tipo de fusible mecánico ya que actúa como elemento de seguridad pasiva en automóviles y trenes. En automóviles turismo, los DEFOs se encuentran normalmente situados entre la traviesa del parachoques y los largueros delanteros del chasis; sin embargo, en vehículos de corte deportivo o de competición no es extraño encontrar soluciones diferentes.



Figura 1. Defo de acero



Figura 2. Disposición de los Defos en un automóvil

En trenes, además de los Crash-Box de deformación plástica, se emplean sofisticados dispositivos de disipación hidráulica, los cuales se encuentran instalados en los extremos de los vagones desempeñando también las funciones de elemento conector.

A menudo los cambios realizados afectan a determinados componentes mecánicos, como los DEFOs, críticos para el comportamiento de la estructura del vehículo en caso de impacto. Los DEFOs son piezas muy sensibles a los cambios en su diseño y condiciones de contorno; de hecho,

su comportamiento tras recibir cualquier modificación puede resultar impredecible. Adicionalmente a esta impredecibilidad, la ausencia de unas pautas claramente definidas de diseño más allá de la propia experiencia del diseñador, pone de manifiesto la dificultad que entraña el ajuste y rediseño de estas piezas.

2.2 Situación y objetivos del proyecto

En el sector de la automoción, los proyectos de desarrollo automovilístico se caracterizan por su larga duración y naturaleza cambiante hasta que se alcanza el modelo definitivo, es decir, el diseño preliminar del vehículo está sometido de forma constante a modificaciones ya que se realizan muchas pruebas de distintas características antes de que el automóvil salga al mercado. Dentro de estos ensayos, se encuentran los de reparabilidad del coche a baja velocidad los cuales simulan impactos a velocidades reducidas para representar situaciones comunes donde el coche se puede ver dañado. Con tal de evitar grandes desperfectos, hay un sistema encargado de proteger la parte interna del coche. Uno de los elementos más importante de este sistema es el **DEFO**, cuya función es absorber tanta energía como sea posible. Este elemento será uno de los núcleos del proyecto.

Mediante la simulación numérica y el método de elementos finitos se pueden conocer los comportamientos que tendrá el vehículo en caso de impacto y, de esta manera, encontrar soluciones de forma rápida, práctica y eficaz. Para conseguirlo hace falta seguir tres fases: pre proceso, la base del cual es la preparación de las geometrías mediante una malla; los cálculos, fase en la que se resuelven los problemas con elementos finitos; y el post proceso, en el que se interpretan los resultados.

Paralelamente, cabe destacar otro foco del proyecto que serán los **materiales compuestos**. El uso de este tipo de materiales está en gran auge en los últimos años, debido a los notables beneficios que reporta gracias a unas buenas propiedades mecánicas ligadas a un reducido peso, entre otras. De esta manera, en muchos campos como la aeronáutica se investigan sus elevadas propiedades mecánicas y en el caso del sector de la automoción su capacidad de absorción de energía en los choques de automóviles.

En resumen a todo lo citado, los **objetivos principales** de este proyecto son:

- Estudiar el elemento del Defo y describir los principales ensayos a bajar velocidad en el sector de la automoción actual.
- Dar una idea general de los materiales compuestos, pudiendo ensayar probetas para obtener datos que introducir en la simulación.
- Ejecutar simulaciones de choque de una geometría de un Defo en su aplicación con materiales compuestos, sacando conclusiones de su comportamiento a diferentes cambios de geometría y composición.

Los programas que se van a usar para llevar a cabo el proyecto son ANSA y Meta de BetaCAE, juntamente con el programa de cálculo con elementos finitos PAMCRASH.

2. ENSAYOS A BAJA VELOCIDAD (RCAR)

En la introducción (1) se ha comentado que se deben realizar muchas pruebas de distintas características antes que un automóvil salga al mercado. Dentro de estos ensayos, se encuentran los ensayos de asociaciones como **RCAR o Euro NCAP**, que establecen ensayos estandarizados que todo vehículo diseñado para circular por la vía pública es recomendable que supere.

Centrando el proyecto en buena parte en el desarrollo de la primera de ellas, la asociación RCAR (Research Council for Automobile Repairs) nació con el propósito de reducir los costos humanos y económicos de las pérdidas de vehículos automotores, trabajando con los fabricantes de automóviles, con el fin de mejorar la dañabilidad y reparabilidad de sus vehículos.

Prestando más atención a la definición de estos dos conceptos en el automóvil, se entiende:

- La **dañabilidad** como la capacidad de un vehículo de soportar los esfuerzos producidos en una colisión, lo que abarca su facultad tanto para absorber la energía del impacto como para limitar las deformaciones y daños en su estructura y componentes
- La **reparabilidad** como la posibilidad y facilidad para su reparación, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Hay que destacar que la mejora de ambas cualidades no debe ir reñida con la seguridad de los ocupantes del vehículo ni con la de otros usuarios de la vía. De esta manera, para evaluar estos conceptos, se somete al vehículo a diversas pruebas de impacto para analizar su comportamiento y sus costes de reparación, clasificando cada modelo en función de los resultados obtenidos. Estos, juntamente con un índice según su resistencia al robo, serán los que proporcionarán a las aseguradoras los índices de cada vehículo para clasificarlos según los resultados y calcular las “primas de seguro” del automóvil.

En la siguiente *Figura 3* puede verse la distribución porcentual de los impactos más habituales sufridos por un vehículo. De acuerdo con esta, los impactos en la parte frontal acumulan cerca del 67 % del total, por ello no es de extrañar que se preste especial interés en la seguridad pasiva de esta zona, contrastando la importancia de los Defos.:

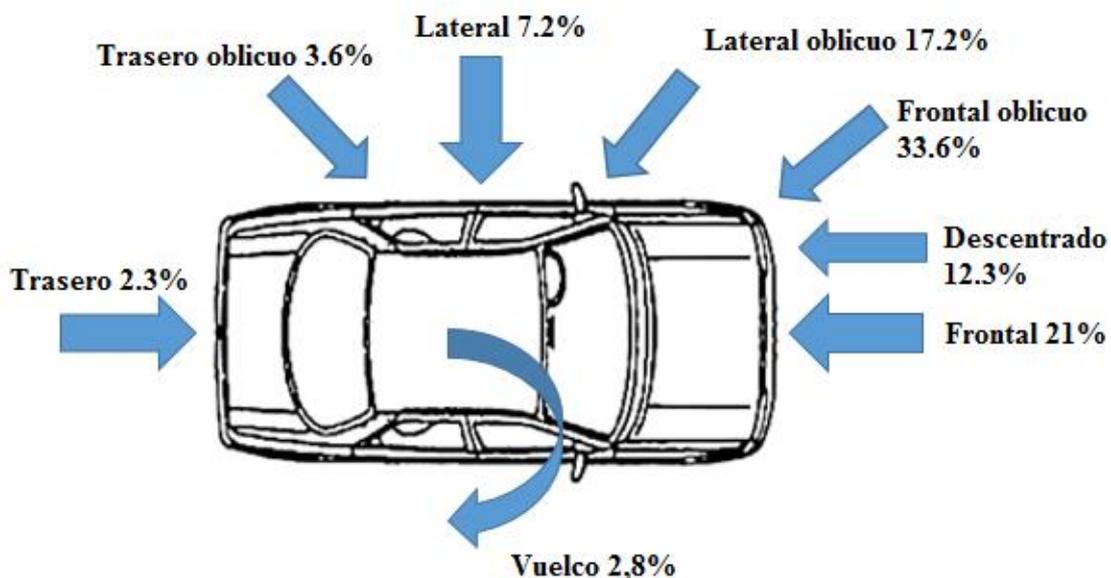


Figura 3. Distribución porcentual de los impactos de un vehículo

2.1 Funcionamiento

En los ensayos de RCAR se posicionan los elementos que impactarán en el coche en puntos preestablecidos que representan una situación real, siempre siguiendo la normativa (RCAR Low-Speed Structural Crash Test Protocol). Este tipo de ensayos se fijan en los daños que se producen en la zona del parachoques y, de este modo, poder hacer una estimación económica de la reparación. Los resultados de estos ensayos determinarán que el **seguro del coche** sea más o menos caro según la marca y el modelo que se quiera adquirir. Si los resultados son satisfactorios el seguro será más barato, ya que en caso de choque a baja velocidad la reparación de los daños será menor que en un modelo de coche que no haya obtenido resultados tan satisfactorios.

El **objetivo** es exigir a los fabricantes diseñar un coche donde las piezas preparadas para recibir el impacto se puedan reparar sin dificultad y a bajo coste. Mientras que los daños en piezas más costosas, como pueden ser los faros o el sistema de climatización, no se deben ver afectadas por una deformación plástica.

La **velocidad** a la que se desplaza el coche en los ensayos de RCAR varía según el tipo de ensayo, pero siempre es un valor equivalente a un pequeño choque aparcando o de alcance con otro coche a muy baja velocidad. A estas velocidades los ocupantes que se encuentran en el habitáculo no sufren daños personales. Por esto, en este tipo de ensayos, el objetivo se centra en minimizar el daño del coche ya que los ocupantes se entiende que no sufrirán daño alguno. En la siguiente *Figura 4* se puede apreciar un ensayo tipo Bumper:



Figura 4. Ensayo RCAR Bumper test realizado por Allianz Seguros.

(Fuente: Allianz seguros)

2.2 Elementos principales: CMS (Crash Management System)

En primer término, a uno le viene en mente que el principal componente para este tipo de ensayos que absorbe la mayor parte de energía de un impacto es el parachoques, pero actualmente y a pesar de su nombre, la solución está basada en otros sistema específicamente diseñados para tal efecto. Los principales elementos para la protección del vehículo y pasajeros ante un choque a baja velocidad son la traviesa y los Defos, o en otras palabras, el **conjunto CMS** (Crash Management System). Sus principales características son:

- Va instalado tanto en la parte delantera como trasera del vehículo.
- Su objetivo es absorber energía y restringir el daño producido en la colisión a piezas que se puedan reparar o cambiar fácilmente evitando daños estructurales y la sustitución de piezas costosas → tiene que saber "encajar el golpe".
- Debe poder ser remplazado sin cortar ni soldar.
- Debe poder ser instalado por uno nuevo sin problema.

Como se ha comentado, dentro del conjunto CMS se encuentran los Defos que actúan como puntos fusibles evitando que haya daños principalmente en los largueros del vehículo, así como en otras partes de este. En la Figura 5 se puede observar bien diferenciado el conjunto CMS (traviesas y Defos), y en la Figura 6 la plastificación deseada que sufren los Defos en un impacto:

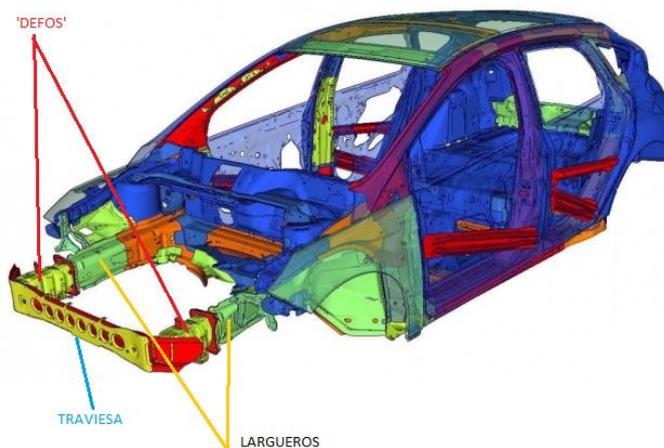


Figura 5. Traviesas, Defos y largueros en Ford Focus mkII

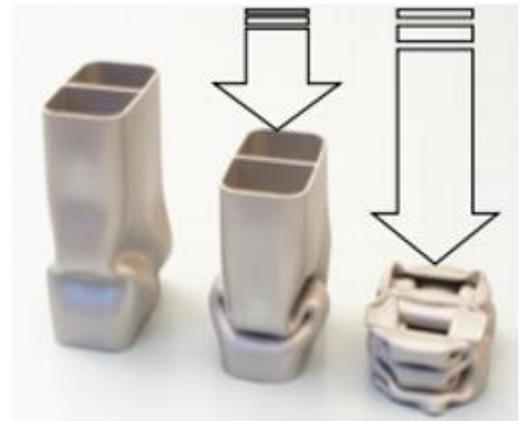


Figura 6. Sucesión de aplastamiento Defos

El CMS y en especial la traviesa deben diseñarse de tal manera que exista un determinado **solape** con la barrera de RCAR Bumper, que posteriormente se explicará, y su función no es más que la de simular el conjunto CMS de un vehículo estándar real contra el que se va a impactar. Cumplir este criterio es esencial para evitar efectos de "underride" o falta de solape durante la colisión. Otra característica muy importante de la traviesa es la resistencia a torsión, que tiene el efecto de evitar movimientos torsionales en caso de sufrir cargas excéntricas; y con la gran evolución de los SUV's, es también importante mantener la traviesa estable durante todo el choque por tal de evitar que se sobreponga o justo lo contrario y que se produzcan daños no deseables, visto en Figura 7.



Figura 7. Override del coche rojo sobre el coche negro (Fuente: Youtube)

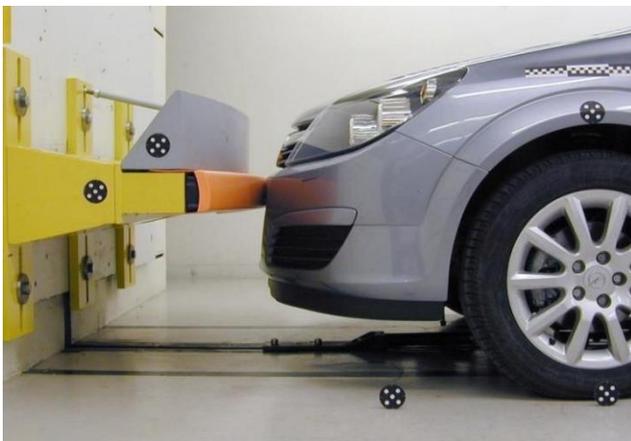
Son muchos los factores a tener en cuenta para realizar y superar los ensayos RCAR, y la dificultad viene dada en que tienen que cumplirlos todos con los mismos elementos; además que se tienen que complementar con otras pruebas que se realizan para la homologación final del coche. De esta manera, a modo de resumen los **factores más destacables** a tener en cuenta son:

- ✓ Absorción de energía: tiene que absorber la energía producida en el coche con el objetivo de no dañar otras partes del coche.
- ✓ Estabilidad: el parachoques tiene que ser suficiente algo y ancho para poder encajar con los parachoques de otros coches en caso de colisión
- ✓ Geometría: el parachoques tiene que estar posicionado en una altura mínimamente común y que alcance los laterales de este para prever menores daños en caso de choque lateral.

A continuación se presentan los diferentes ensayos que se realizan para evaluar la capacidad de daño de un vehículo y su reparabilidad. Es importante distinguir entre los ensayos propios de RCAR por otro lado los ensayos de pared y péndulos que se realizan para un correcto diseño y desarrollo del parachoques.

2.3 RCAR Bumper Test

Este ensayo evalúa el conjunto travesía y Defos, y se estudia el comportamiento de la travesía (tanto delantera como trasera) en un impacto a baja velocidad. Se trata de hacer colisionar el coche, elemento que se desplaza a 10,5 km/h hacia adelante en el caso de choque anterior y hacia atrás en el caso contrario, contra una barrera fija que simula otro parachoques. El coche impacta en la totalidad de su offset, es decir, impacta toda su anchura contra la barrera.



*Figura 8. Ejemplo choque tipo Bumper
(Fuente: SafetyFirstTv)*



Figura 9. Simulación choque tipo Bumper del Seat Arona (Fuente: Seat)

El objetivo de este ensayo es múltiple:

1. Se comprobará que no exista ni “*underride*” ni “*override*”. O en otras palabras se comprobará que no exista una excesiva diferencia en las alturas de la travesía con respecto al suelo.

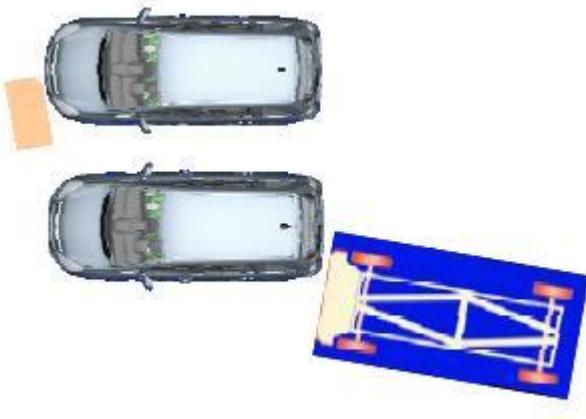
2. De igual manera, el conjunto traviesa debe tener compatibilidad con la barrera RCAR Bumper, lo que asegurará un suficiente solape entre las traviesas, a pesar de los cambios de posición debidos a la dinámica de la conducción.
3. La capacidad de absorción de energía ha de ser suficiente para no transmitir daños a otras partes del vehículo

El automóvil debe estar preparado para impactar con el máximo realismo posible y debe presentarse a las pruebas con el peso nominal del fabricante más el peso del combustible, llenando el depósito como mínimo al 90%, y los dispositivos de prueba. Los neumáticos se inflan a la presión recomendada para las condiciones del ensayo correspondiente. Finalmente, también se añade un peso de 75kg en el sitio del piloto, para simular el peso del conductor. Todos los dispositivos externos que contienen los sensores para obtener los resultados de los choques se sitúan en puntos clave para influir lo menos posible en la dinámica del coche.

2.4. RCAR AZT

El ensayo AZT (Allianz Zentrum für Technik), a diferencia del Bumper, tiene la colisión en la zona lateral del parachoques. También se realiza tanto en la parte anterior como posterior del vehículo, pero en este caso el principal elemento de protección del que dispone el vehículo para absorber la energía puesta en juego en el impacto es el Defo:

- En el caso de choque delantero, el vehículo es impulsado a una velocidad de 15+1 Km/h contra barrera fija a 10°. El vehículo impacta con un offset del 40%.
- En el choque trasero, una barrera móvil de 1400kg es impulsada a 15+1 Km/h contra vehículo parado a 10°. La barrera impacta con un offset de 40%.



*Figura 10. Ejemplo del choque AZT
(Fuente:LS-DYNA)*



*Figura 11. Simulación choque tipo
AZT del Seat Arona (Fuente: Seat)*

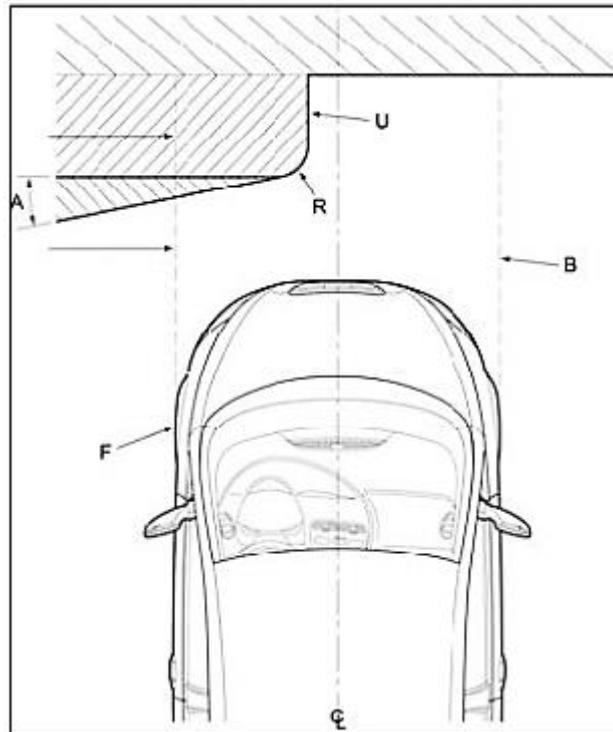


Figura 12. Descripción gràfica del choque AZT. (Fuente: RCAR)

Un dato importante a tener en cuenta en la realización de este tipo de ensayo es el 40% offset. Dicho en otras palabras, la barrera tiene que impactar con el coche en un 40% del total de su anchura. Normalmente, hay marcas visibles en el coche que se usa en el ensayo que indican donde tiene que impactar.

En este choque la velocidad es mayor, la colisión es a 15 ± 1 km/h. Los daños que se producen son parecidos al Bumper pero hay perjuicios en otros puntos que se tienen que mirar de cerca. Dentro los daños permitidos están el parachoques junto con la traviesa y el capó, que se dañan en ambos casos y se tienen que sustituir, y se permite el daño y la sustitución de las fijaciones de los faros. También hay que tener en cuenta el guardabarros, el cual, como mucho, debe sufrir daños reparables. También se miran detenidamente el paquete de refrigeración, las puertas o portón, que no deben tener daños.

2.5. Wall

El ensayo de pared se engloba dentro de los ensayos para desarrollar el parachoques. En este, el vehículo es impulsado directamente contra una barrera, que simula una pared rígida y fija, a una velocidad de 4,25km/h, tanto en la parte anterior como posterior. El impacto afecta al 100% del offset, es decir, toda su anchura, igual que el Bumper, pero variando la barrera.



Figura 13. Simulación y choque real tipo pared del Seat Arona (Fuente: Seat)

Es uno de los ensayos más restrictivos ya que tras el ensayo se debe asegurar que no existen daño en ninguno de los componentes del vehículo y además asegurar que no hay daños visibles en el parachoques.

2.6. Péndulos

Los ensayos de péndulos pretenden simular las condiciones de un impacto a baja velocidad, a unas velocidades entre 2.5 y 5 km/h, contra otro automóvil, y asegurar que no resulta dañado ningún otro elemento del vehículo. La prueba se efectúa con el vehículo parado, sin frenos y sin ninguna marcha metida. Un péndulo de igual masa que el vehículo lo golpea, provocando la deformación del parachoques, que debe ser capaz de soportar el impacto, y evitar que otras piezas, como son los faros, aletas y capó, resulten dañadas. Además se le añade un caso: la barrera de péndulo impacta en las esquinas del coche a una velocidad de 2,6 km/h. Se realiza tanto en la parte anterior y posterior del vehículo; y la barrera tipo péndulo va equipada de sensores para poder medir la fuerza del impacto y las aceleraciones que puedan surgir.

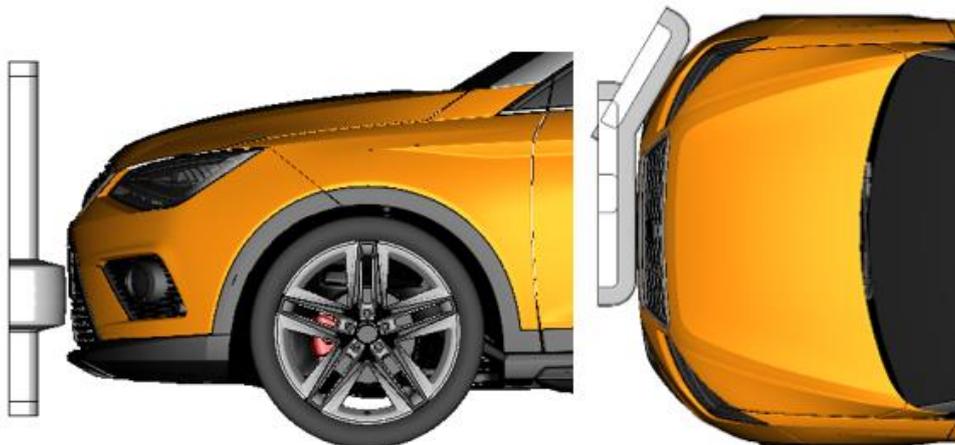


Figura 14. Simulación tipo péndulo frontal del Seat Arona (Fuente: Seat)

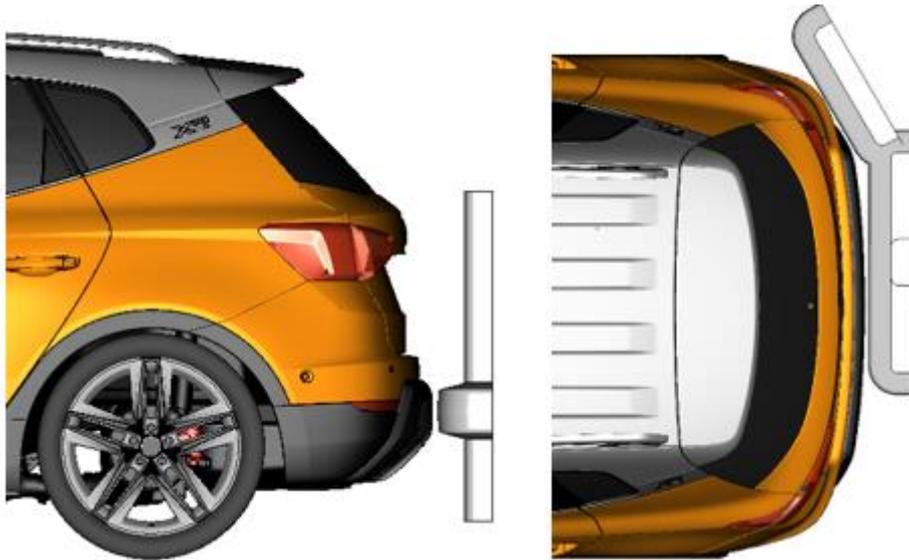


Figura 15. Simulación tipo péndulo lateral del Seat Arona (Fuente: Seat)

3. ESTADO DEL ARTE

El objetivo de este apartado es explicar con más detalle el entorno y las características más importantes de los DEFOs. Con esta información se pretende profundizar mejor la funcionalidad de este elemento dentro del sistema y su comportamiento en caso de choque.

3.1. Conceptos generales del entorno del DEFO

El DEFO es la unión entre la traviesa y los largueros. Actúa como un fusible entre ambas partes, absorbe la energía del choque mediante la deformación plástica con el propósito de que esta no dañe plásticamente los largueros. Estas dos piezas, la traviesa y los largueros, tienen funciones distintas y características distintas. En la Figura 5 del apartado anterior se pueden apreciar sus posiciones.

La **traviesa** se encuentra justo detrás del parachoques y se encarga de recibir el golpe en primera instancia y, seguidamente, disipa y reparte el esfuerzo en toda su superficie. Esta está unida con el resto del automóvil a través de los DEFOs. Se han realizado distintos estudios con el objetivo de mejorar la seguridad del coche en caso de impacto a alta velocidad optimizando la forma de la traviesa.

Los **largueros** están situados entre los DEFOs y el habitáculo del automóvil. Es una pieza que no debe verse dañada en un choque a baja velocidad ya que es de las partes que aportan más rigidez del bastidor. También actúa como soporte del tren delantero o como apoyo de motor, por lo que, aparte de tener una función importante, tiene una cierta complejidad sustituir estas piezas por otras.

Un aspecto a tener en cuenta es el **sistema de referencia** que se escoge. Los ejes de referencia servirán tanto para posicionar los distintos elementos como para el modelo en sí; es muy importante tenerlo presente en todo momento. En el caso específico de este proyecto los ejes elegidos son los siguientes:

- Eje Vertical (X): perpendicular al plano YZ (suelo) en sentido ascendente
- Eje Longitudinal (Y): perpendicular a la dirección de avance.
- Eje Transversal (Z): paralelo a la dirección de avance del automóvil.

Cabe comentar que los típicos usados en automoción son XY en referencia suelo y Z perpendicular a ellos.

3.2. Características y objetivos del DEFO

La característica básica y fundamental de un DEFO es la **capacidad de absorción** de energía en un choque, cuanto mayor sea esta capacidad, más eficiente será el elemento. Para conseguir este objetivo, en gran parte de los casos se generan 'crash beads', pequeñas entallas, que indican donde iniciar la deformación plástica y permiten al DEFO colapsar con mayor facilidad.

Existen distintos tipos de DEFOs, pero hay características comunes para todos ellos:

- Tienen de función de disipar la mayor cantidad de energía que se pueda durante el choque, tratando de minimizar los daños en los largueros. La disipación de energía debe ser, mayormente, mediante deformaciones plásticas.

- El diseño debe ser apto para toda la producción para garantizar estabilidad en el comportamiento, el cual debe ser homogéneo en todas las unidades producidas.
- Económico y reemplazable. Una vez el DEFO actúa queda deformado plásticamente, por lo que no se puede reutilizar. Por este motivo es importante que sea económico y de fácil reemplazo.
- Las dimensiones del DEFO deben encontrar un equilibrio entre el espacio que ocupa en el automóvil y el espacio requerido para la absorción de la energía, siempre priorizando esta última.

El comportamiento de los DEFOs es vital para proteger los largueros y para evitar el mayor daño posible, por lo que hay unos parámetros a tener en cuenta en el momento de diseñarlo.

3.2.1 Intrusión

La intrusión es una medida de la deformación que sufre el conjunto DEFO-travesía. Mide la diferencia en la distancia entre una serie de puntos de referencia antes y después de la deformación. Se trata de un parámetro crítico ya que, si la intrusión es muy elevada, es probable que el sistema de refrigeración del motor y otros sistemas auxiliares ubicados en la parte frontal sufran daños, algo nada deseable ya que los costes de reparación serían mayores. En las siguientes figuras se puede observar las referencias de los crash-box para medir correctamente la intrusión, que se basan en la colocación de sensores en dichos puntos de referencia.

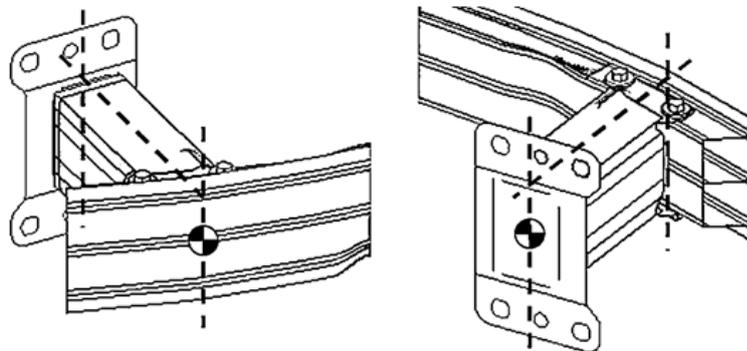


Figura 16. Referencias crash-box para intrusión

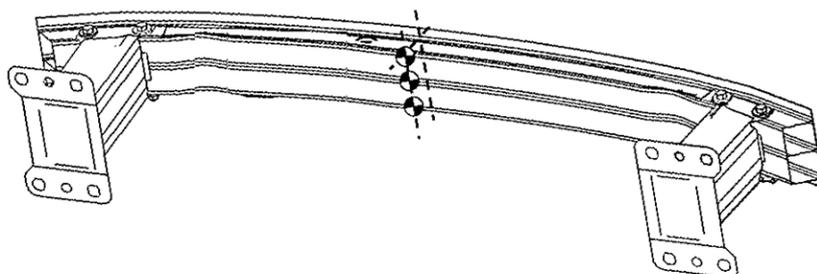


Figura 17. Referencias travesía para intrusión

3.2.2 Desplazamientos larguero

En los impactos a baja velocidad, aquellos para los que el DEFO es diseñado, hay un parámetro crítico que se evalúa tras el impacto: los desplazamientos de los largueros. Las deformaciones NO elásticas que sufran los largueros, ya que por encima de un determinado valor, unos 2 mm aproximadamente, los daños en los largueros son relevantes. Una deformación excesiva de los largueros puede traducirse en una alteración de la geometría del chasis, algo que sin duda afectará al comportamiento del vehículo.

3.2.3 Fuerzas de sección y fuerzas pico (PCF)

Las fuerzas de sección son las fuerzas transmitidas a los largueros desde la última sección del DEFO. Durante los primeros instantes del impacto se alcanza un máximo en las fuerzas de sección, esta fuerza se conoce como fuerza pico o “peak crush force” (PCF). Este valor se espera que sea menor que un valor umbral, determinado previamente y que por encima de este valor estructuras importantes del vehículo, como los largueros, pueden sufrir daños irreparables o permanentes.

En la siguiente figura se puede ver el diagrama de fuerzas de sección respecto el desplazamiento.

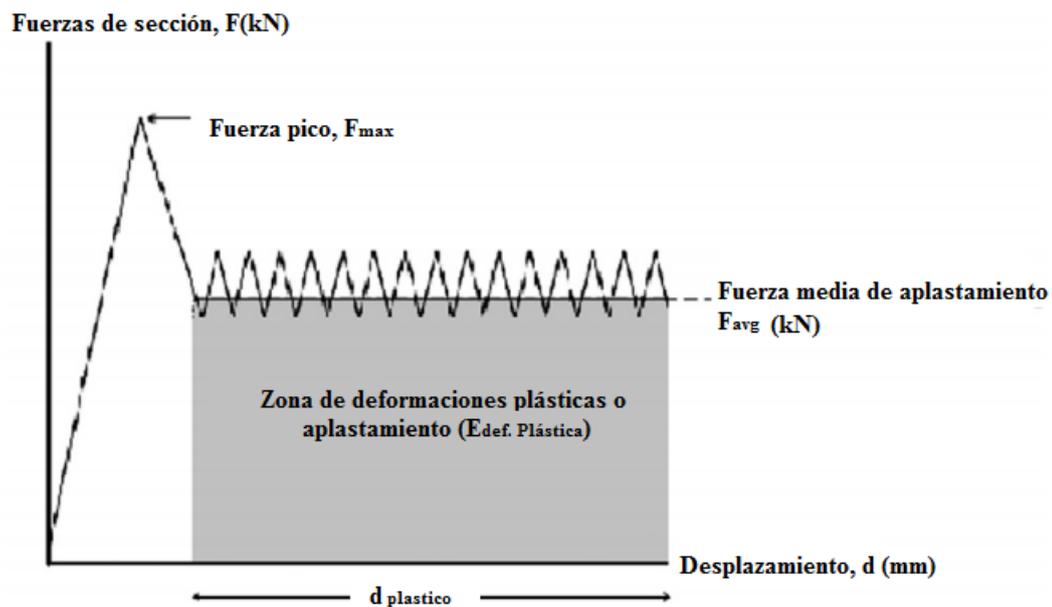


Figura 18. Diagrama de fuerzas de sección-desplazamiento

3.2.4 Eficiencia de fuerzas de aplastamiento (CFE)

Tanto las fuerzas de pico como las fuerzas medias son parámetros importantes del impacto ya que están directamente ligados a las **deceleraciones** que experimentarán los ocupantes del vehículo. La eficiencia de fuerzas de aplastamiento o 'Crush Force Efficiency' (CFE) mide la variabilidad de las fuerzas producidas por el DEFO, por lo que son fuerzas transmitidas a los largueros.

La eficiencia se puede medir mediante la relación entre las fuerzas pico y las fuerzas medias que se producen en el impacto, visto en la siguiente expresión (3.1) y representado en la Figura 18 anterior. El mejor escenario tiene lugar cuando esta relación es cercana a la unidad, en este caso el DEFO se deformará con una fuerza cercana a la fuerza pico, eso quiere decir que se minimizan los cambios en las deceleraciones. El caso contrario ocurre cuando la relación se encuentra alejada del valor unitario, por lo que se pueden experimentar variaciones rápidas de la deceleración, escenario no deseable:

$$CFE = \frac{F_{avg}}{F_{max}} \quad (3.1)$$

Donde F_{max} es la fuerza de pico y F_{avg} es la fuerza media, ambas en kN, esta última se puede definir como 3.2 representando la fuerza de sección del desplazamiento y siendo δ es el desplazamiento en mm.:

$$F_{avg} = \frac{\int_0^{\delta} F(x)}{\delta} \quad (3.2)$$

3.2.5 Energía absorbida por unidad de masa (SEA)

La energía absorbida por unidad de masa o 'specific energy absorption' (SEA) se define como la cantidad de energía por unidad de masa que es capaz de absorber el DEFO. En este caso, interesa tener un valor mayor, el cual indicará que el diseño del DEFO es eficiente. Es decir, el DEFO necesitará menos cantidad de material para absorber la misma cantidad de energía.

La energía absorbida por unidad de masa viene dada por la siguiente expresión:

$$SEA = \frac{\int_0^{\delta} F(x)}{m} \quad (3.3)$$

Donde m es la masa del dispositivo de gestión de impacto, en kg. Para saber si un DEFO es eficiente o no se puede determinar según los valores de los tres parámetros explicados: cuanto menor sea el valor de PCF y mayores sean los de CFE y SEA más eficiente será. Esta magnitud corresponde al área encerrada bajo la curva de fuerza-desplazamiento.

3.2.6. Modos de fallo de la sección

Un Defo estándar usado en automoción, los cuales suelen estar compuestos de acero, puede deformarse axialmente replegándose sobre sí mismo (aplastamiento) o bien doblándose lateralmente (flexión lateral), visto en la Figura 19. Normalmente es preferible el primer modo

de deformación ya que presenta niveles superiores de SEA, se aprovecha mejor la capacidad del dispositivo y la deformación es más controlable; sin embargo, si el DEFO es muy esbelto o las cargas tienen cierta componente lateral este podría fallar por flexión lateral.

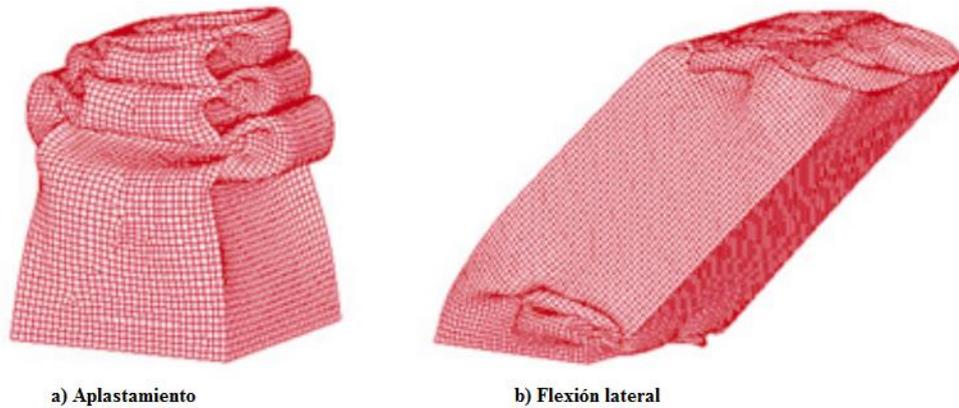


Figura 19. Modos de fallo de un Defo

Referenciando [5], se han realizado estudios variando el ángulo de la carga para determinar a partir de que valor se produce la transición de aplastamiento a flexión lateral. En la Figura 20 puede verse la evolución del SEA para distintas geometrías:

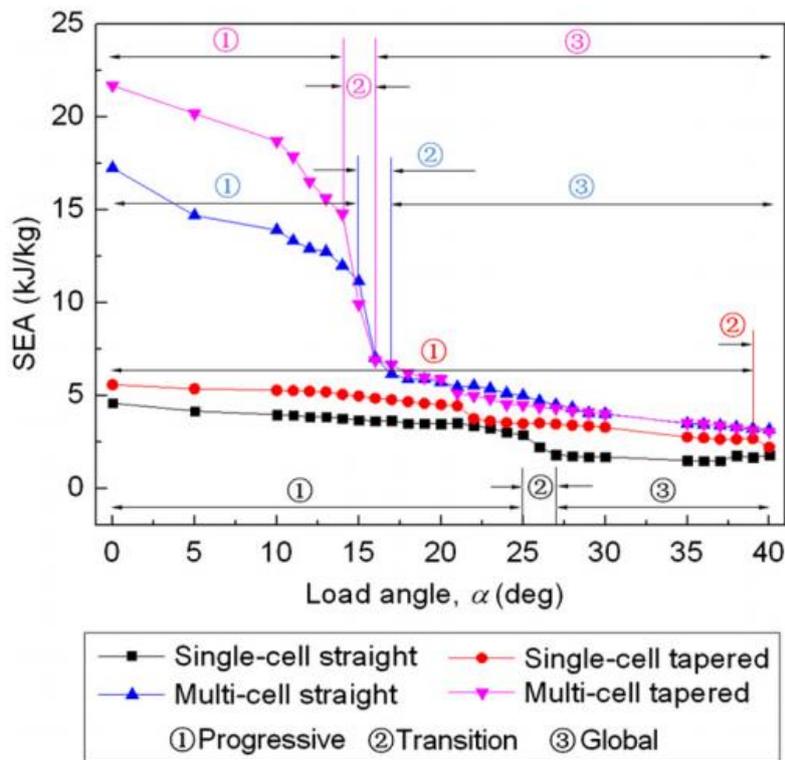


Figura 20. Influencia del ángulo en modo de fallo

En este proyecto, nos centramos en los materiales compuestos los cuales tienen un comportamiento diferente en la deformación y en los índices de absorción de energía. Como se

puede ver en las siguientes figuras, se compara el ensayo de estructuras de acero y material compuesto. El acero asimila la deformación con un pliegue sobre si mismo, y en cambio, el material compuesto ofrece más resistencia debido a su rigidez y en lugar de seguir este tipo de deformación, va colapsando gradualmente a medida que se aplica la carga o el choque en el ensayo. Se puede observar la rotura o desprendimiento de las fibras del material compuesto, comportamiento que se intentará simular en el modelo haciendo que los elementos correspondientes a las fibras rotas desaparezcan de la simulación a la que acumulen un **porcentaje de daño** determinado.

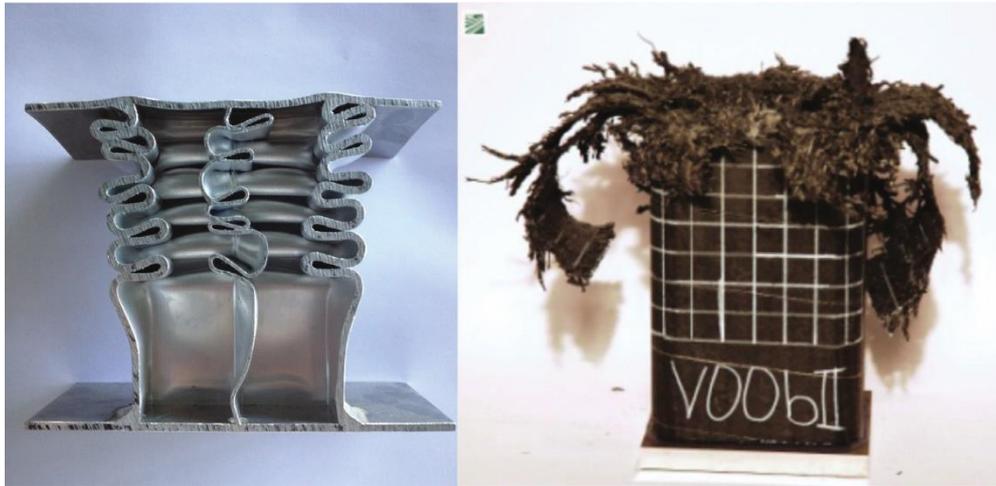


Figura 21. Defos de acero y fibra después de ensayar. (Fuente [2])

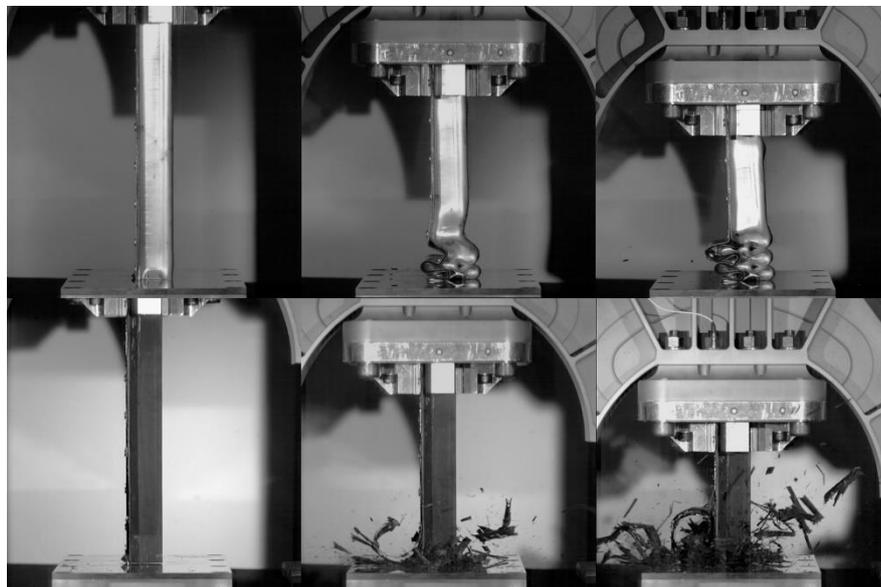


Figura 22. Ensayo de estructuras de acero y fibra de carbono (Fuente [2])

3.3. Clasificación

No existe un solo diseño para el DEFO, al contrario, hay infinidad de posibilidades. Hay muchos criterios para clasificar estos elementos, y factores que condicionan su variabilidad, pero los más comunes son las que se explican a continuación.

3.3.1. Según técnicas de unión y geometría

El criterio más generalizado se distinguen los perfiles dependiendo si son cerrados o con unión y según su geometría. Los DEFOs de perfil cerrados son aquellos que se componen de una sola pieza, suelen usarse para aplicaciones experimentales con el fin de sacar conclusiones extrapolables en mayor o menor medida al conjunto de perfiles con unión. Los DEFOs de perfil con unión son aquellos que lo conforman dos piezas distintas unidas mediante procesos de soldadura. La industria automovilística suele optar normalmente por este segundo tipo de soluciones ya que su fabricación mediante estampación permite reducir mucho los costes, y la unión puede realizarse mediante procesos de soldadura automatizada. Tanto en secciones cerradas como en secciones con unión, pueden encontrarse secciones rectas o secciones con geometría tronco-cónica o piramidal. En este proyecto, como se verá más adelante, se ha optado por una geometría tronco-cónica.

Dentro del grupo de perfiles cerrados hay una serie de geometrías más estudiadas que las otras. Las secciones más usadas, son las siguientes:

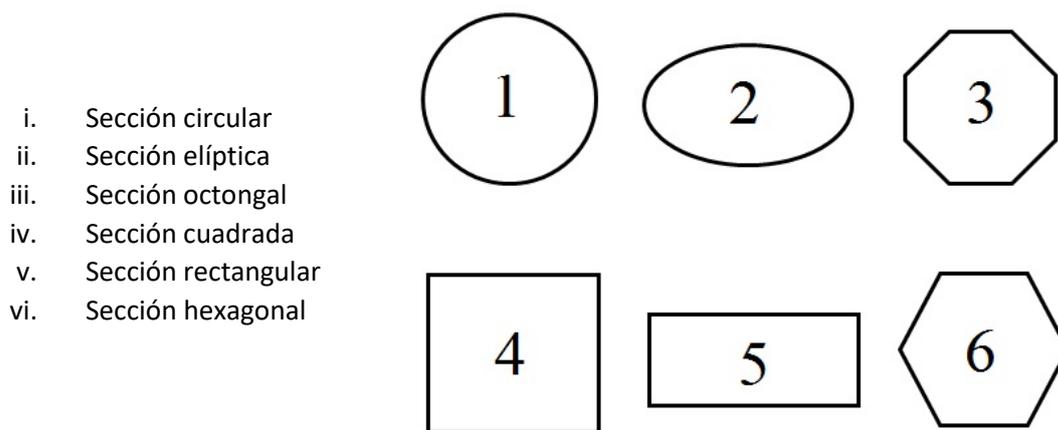


Figura 23. Tipos de secciones cerradas

Dentro del grupo de perfiles por unión se pueden encontrar dos subclasificaciones: según la técnica de unión o según la geometría de la sección.

Se distinguen las siguientes soluciones para las técnicas de unión:

- Unión mediante **puntos de soldadura**: solución más extendida por su bajo coste. Se usa mayoritariamente la técnica de soldeo por resistencia.

- Unión mediante **soldadura continua**: se encuentra más en aplicaciones experimentales que reales. De este modo, se disipa más energía en cargas de impacto, pero los valores de PCF son elevados y el coste es mayor que en técnica anterior.

- Unión mediante **adhesivos técnicos**: su uso se ha visto extendido en el sector automovilístico debido a la evolución positiva que ha experimentado. Aunque se requiere una preparación de

la superficie y son un poco inestables, se consigue amortiguar ligeramente la unión, las prestaciones mecánicas son buenas y no hay afectación térmica en la zona.

- Uniones **adhesivas estabilizadas**: Si las uniones adhesivas se estabilizan con uniones mecánicas, como por ejemplo con remaches, presentan una mayor absorción de energía y un comportamiento más homogéneo y estable.

Y en la Figura 24 se pueden apreciar los criterios según las distintas geometrías de unión. La mayoría de ellas tienen comportamientos altamente similares, a excepción de G que muestra fuerza de pico superiores. Las geometrías de borde saliente (A,B,F,G,H) en general presentan rigidices algo superiores. Actualmente, en la industria europea, las soluciones más empleadas son las secciones de la forma C, D y E:

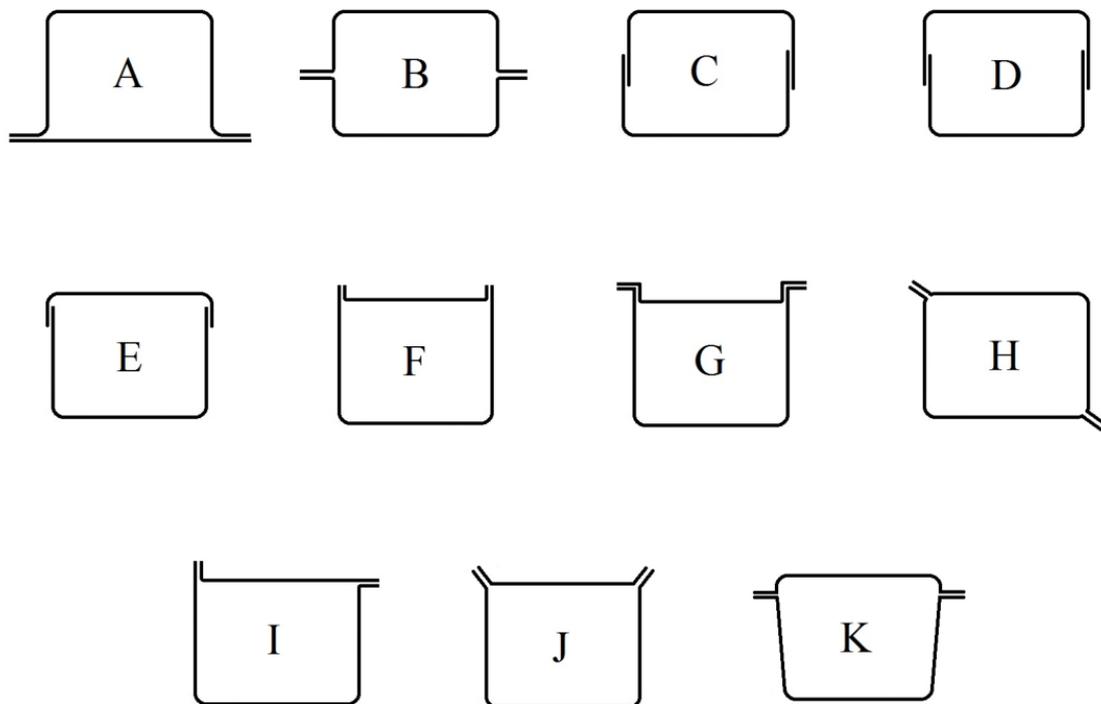


Figura 24. Secciones unidas más comunes

3.3.2. Clasificación según número de células

El número de células hace referencia a la cantidad de subsecciones que presenta el perfil. En los DEFOs convencionales se emplean habitualmente soluciones unicelulares, sin embargo en algunas aplicaciones especiales y en ensayos académicos no resulta extraño encontrar soluciones multicelulares. Las soluciones multicelulares se presentan como una solución prometedora en lo que a sus prestaciones se refiere. La mayor capacidad de absorción de energía las hace muy atractivas, sin embargo, un mayor coste y unas fuerzas pico de deformación superiores a las soluciones convencionales hacen que no se utilicen más a menudo en la industria de automoción.

3.3.3. Según material

Existe mucha diversidad de materiales disponibles para la fabricación de DEFOs, pero en la práctica los materiales se reducen a 3 familias:

- **Aleaciones de acero:** es el material por excelencia en el sector de la automoción. La evolución de la técnica en las aleaciones ha conseguido comportamientos mecánicos y una relación resistencia-peso mejores. Esto se ve traducido en una reducción del peso genérico y la fabricación de piezas más seguras.

- **Aleaciones de aluminio:** el uso del aluminio es para estos fines está en crecimiento debido a su bajo coste, su peso reducido y la buena resistencia a la corrosión. Normalmente se emplean aleaciones de resistencia media por ser las que mejores propiedades de maquinabilidad presentan. Dada sus propiedades mecánicas inferiores es más habitual el uso de soluciones multicelulares para compensar.

- **Materiales compuestos:** su uso actualmente es prácticamente exclusivo de los vehículos de competición o de altas prestaciones. Esta solución se emplea juntamente con otras soluciones geométricas para conseguir otro tipo de resultados. Los compuestos más usados son la fibra de carbono y la aramida, que a menudo se combinan para obtener mejores comportamientos. La fibra de carbono será el material compuesto usado en este proyecto.

3.3.4. Según crash beads

Los crash beads o triggers son iniciadores de la deformación plástica. Son pequeñas modificaciones en la geometría en puntos concretos con la intención de facilitar el inicio de las deformaciones y tener un control sobre ellas, en la ubicación y la secuencia. Si la deformación es controlada, está bien localizada y es homogénea, facilita la obtención de mejores resultados en las fuerzas pico, hecho que permite ser menos estrictos con sacrificar excesivamente la capacidad de absorción de energía.

Hay distintos modos de poner iniciadores de la deformación que hacen que el comportamiento del DEFO sea uno u otro. Pueden ser muescas, muescas circulares, protuberancias semiesféricas, taladros o agujeros ovales. Los más utilizados en automoción son iniciadores de rebaje en junco, reducción del espesor o buñas alternas. Este último es el más usado y el que se estudia en este proyecto. En las siguientes figuras se pueden observar los distintos modos:

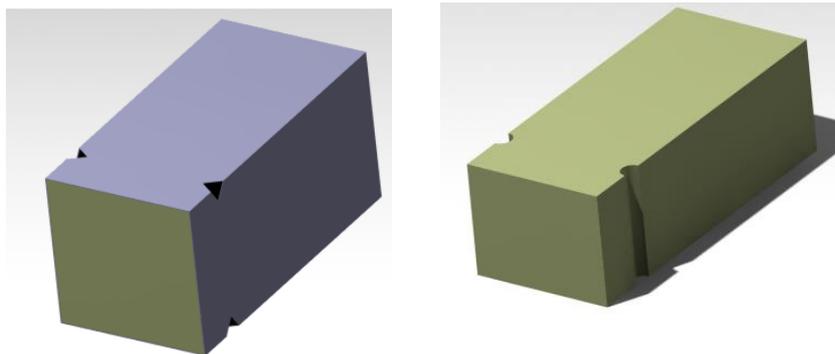


Figura 25. Defos con muescas y rebaje en junco, respectivamente

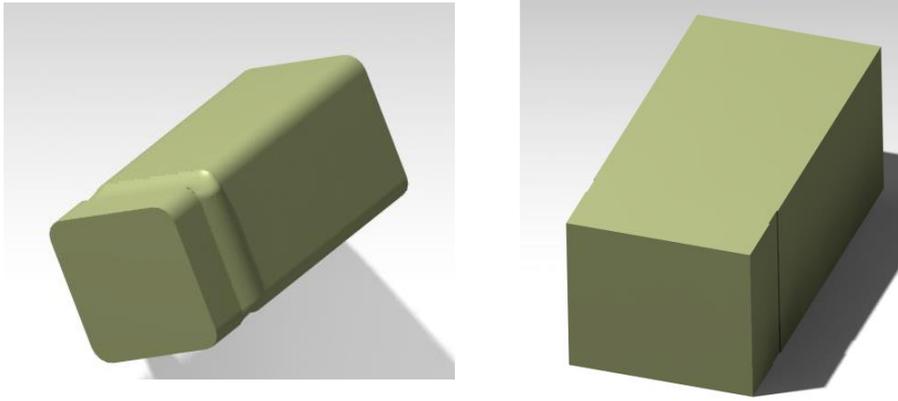


Figura 26. Defos con buñas y reducción de espesor, respectivamente

En este proyecto, como se verá más adelante, se admitirá una geometría tronco-cónica sencilla sin la presencia de buñas al largo del cuerpo del DEFO, para su mejor supuesta construcción con materiales compuestas.

3.4 Apuntes sobre el estado del arte

A continuación, se presentan varios apuntes en modo resumen relacionados con los DEFOs, enfocados al desarrollo del proyecto para sus geometrías y materiales:

1. En general los perfiles multicelulares presentan valores superiores de SEA y PCF, y al ser más rígidas, presentan caídas más acusadas del SEA cuando cambian de modo de fallo.
2. Espesores menores se traducen en menor SEA, pero disminuyen el PCF y normalmente mejoran el CFE ya que al reducir el PCF la relación entre este y las fuerzas medias, es más próximo a la unidad.
3. Las geometrías cónicas son preferibles. Muestran un mejor comportamiento ante esfuerzos oblicuos y buenos índices de SEA.
4. Si se opta por geometrías cónicas y se desea maximizar el CFE hay que emplear espesores menores y algunos iniciadores de deformación junto con ángulos de cono intermedios, mientras que para maximizar el SEA hay que irse a mayores espesores, hasta un límite, ángulos de cono menores y menor número de iniciadores.
5. El uso de nuevos materiales y perfiles rellenos ofrecen nuevas y posiblemente mejores oportunidades de diseño. Si bien su coste hace que por ahora no sean algo común.

4. MATERIALES COMPUESTOS

4.1 Definición y características

Con el aumento de las necesidades del ser humano de disponer de soluciones tecnológicas cada vez más exigentes, surge la necesidad de disponer de nuevos materiales que sean capaces de combinar las propiedades de diferentes materiales como los cerámicos, los plásticos y los metales a la vez, los materiales compuestos.

Los materiales compuestos o **composites** son materiales conformados, en una escala macroscópica, por dos o más materiales insolubles el uno en el otro (llamados fases o constituyentes), los cuales se unen de maneras y en proporciones adecuadas, para formar un nuevo material con mejores propiedades a las de los constituyentes. Los compuestos aprovechan las propiedades de cada uno de estos de tal manera que pueden lograrse combinaciones de propiedades que son difíciles de obtener en materiales convencionales, teniendo lugar un efecto sinérgico, como por ejemplo, alta relación resistencia-densidad o rigidez-densidad. Un ejemplo clásico de material compuesto es el concreto reforzado, conformado por una matriz cerámica con partículas (de naturaleza silíceas), reforzada con varillas de acero, las cuales le conceden al compuesto resistencia a la tracción y tenacidad. Normalmente, la fase conocida como refuerzo, como sería la fibra, es resistente y rígida, mientras que la fase base, la matriz, puede tener baja o alta resistencia o rigidez.

A diferencia de los materiales convencionales usados, metales con un comportamiento isótropo, los materiales compuestos en su mayoría presentan un comportamiento anisótropo debido a su estructura. Este comportamiento, dado que conlleva diferentes propiedades mecánicas según la orientación del material, hace necesario un estudio de dichas propiedades en función de cómo se oriente el material con respecto a las cargas aplicadas. En el proyecto en particular, como se avanzará en futuros apartados, se considerará el tejido elegido como isotrópico a 0° y 90° para la simulación.

A la hora de hacer uso de un material en una aplicación ingenieril, o en cualquier otra, es básico el conocer las propiedades de dicho material, sobre todo sus propiedades mecánicas si esa aplicación conlleva una resistencia a cargas externas.

Entre las propiedades que se busca potenciar con la creación de materiales compuestos se encuentran las siguientes:

- Mejores propiedades específicas: resistencia/peso, rigidez/peso.
- Buena resistencia al impacto, determinado por la orientación de las fibras.
- Mejor comportamiento a fatiga que muchos metales.
- Mejor tenacidad.
- Mayor resistencia a la corrosión.
- Menor resistividad eléctrica.

Seguido de una serie de desventajas:

- Muchas propiedades son anisotrópicas (aunque se puede utilizar a favor también).
- Algunas matrices son susceptibles a ataques químicos.
- Generalmente tienen un coste alto.
- Tienen métodos de procesamiento, en general, lentos y caros.

Es destacable comentar que no pertenecen a los materiales compuestos los materiales polifásicos, como las aleaciones metálicas, en las que mediante un tratamiento térmico se cambia la composición de las fases presentes

4.2 Estructura

La gran mayoría de los compuestos están hechos de dos materiales:

1. **Matriz** → configura geoméricamente la pieza, da cohesión al material y es la responsable de transferir las solicitaciones mecánicas a las fibras además de protegerlas del ambiente externo. Suele ser flexible y poco resistente. Entre las matrices más usadas destacan las resinas (poliéster y epoxi), las minerales (carbono) y las metálicas (aleaciones de aluminio). Otra función de la matriz es aislar las fibras para retardar el crecimiento de grietas, es decir, para aumentar la tenacidad del material. Si las fibras estuvieran en contacto, las grietas crecerían más fácilmente, por lo que el material sería frágil.
2. **Estructura o fibra** → es el elemento que mejora y aporta las características mecánicas del compuesto, como es la resistencia, rigidez, disminución del peso, entre otros. Estas pueden ser cortas, generalmente inyectadas durante el moldeo, o bien pueden ser largas, con la longitud definida de acuerdo a la fabricación. También se distinguen por ser: continuas o discontinuas, unidireccionales o bidireccionales y trenzadas o con distribución aleatoria. Las fibras más comunes utilizadas son: gafito-carbono, boro, vidrio y aramida (kevlar). Independientemente del tipo de material en que estén hechas, las fibras pueden presentarse en forma de hilos, mats, cintas o tejidos.

4.3 Tipos

Para seleccionar el material es importante conocer su aplicación (resistencia mecánica), el coste y la compatibilidad entre la fibra y la matriz (por ejemplo el coeficiente de dilatación térmica de ambos materiales debe ser próximo). Como la definición es bastante completa, los compuestos se caracterizan en tres tipos:

- (i) **Compuestos fibrosos:** Consiste en fibra de un material y matriz de otro. La orientación y el número de fibras es la que determina la resistencia mecánica de los compuestos reforzados con fibras.
- (ii) **Compuestos con partículas:** Están formados por partículas pequeñas de un material suspendido en una matriz de otro material.
- (iii) **Compuestos laminados:** Son compuestos formados por diferentes capas de materiales, incluyendo los dos primeros tipos de compuestos.

En lo que respecta a este proyecto, se prestará importancia a los materiales reforzados con fibras, identificados como FRP en inglés, debido a las siglas "Fiber Reinforced Plastics", o PRF en español, designado por "Plásticos Reforzados con Fibras"; particularmente con fibra de carbono.

Los compuestos reforzados con fibras largas tienen la ventaja de que el material de éstas adquiere una gran resistencia a la tracción al ser conformado en filamentos muy delgados, debido en parte a la reducción del número de defectos. Por ejemplo, un vidrio (E-glass) con resistencia a la tracción de 5 GPa, puede tener una resistencia de unos 70 GPa cuando está en forma de fibra. Por lo tanto, en muchos casos las fibras son las que aportan la resistencia y rigidez al compuesto y son las encargadas de soportar las cargas. La forma, tamaño, orientación y distribución de la fase usada como refuerzo son aspectos claves para controlar las propiedades

del compuesto. Estos pueden darse en forma unidireccional o entrelazados como tejidos, según las propiedades que se requieran.

Particularmente, en este proyecto se usará un material reforzado con fibra de tipo tejido, lo cual implica una confección previa del material en la que se cruzan uno o más hilos alternadamente para formar un material entrelazado. Hay que subrayar que los tejidos no son aptos para adaptarse a formas excesivamente complicadas, sin embargo se pueden acoplar como refuerzo adicional a los materiales de la superficie. Los tejidos se dividen en tres grupos:

- a) **Taffetas o telas (plain weave)**, en las que cada hilo de la urdimbre y trama pasa sucesiva y regularmente por encima y por debajo de los hilos que cruza. Urdimbre y trama tienen igual relieve en ambas caras del tejido.

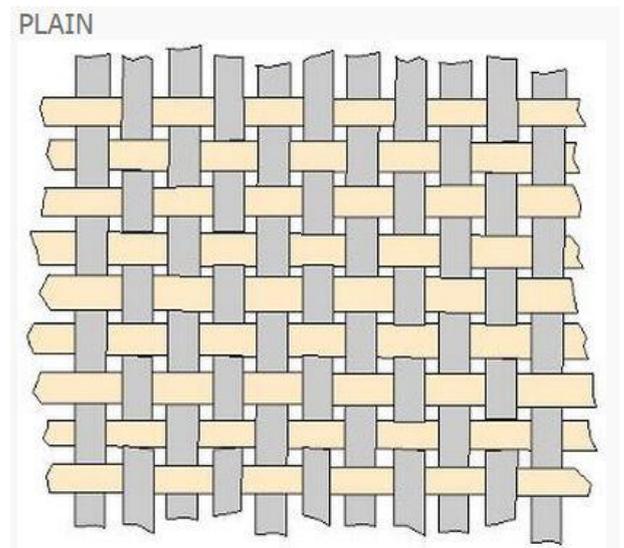
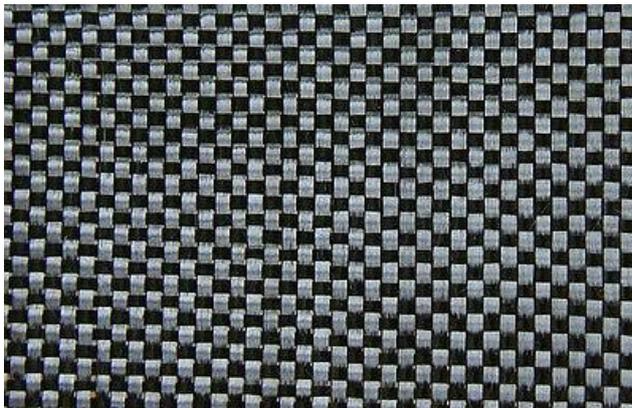


Figura 27. Representación de un patrón 1x1 de fibra de carbono. (Fuente: ScienceDirect)

- b) **Las Sargas (twill)**, en cuya confección, dos o más hilos se cruzan en forma alternada por encima y por debajo de igual número de hilos en trama o urdimbre, respectivamente. Se caracterizan por presentar un típico esquema de líneas diagonales en su superficie.

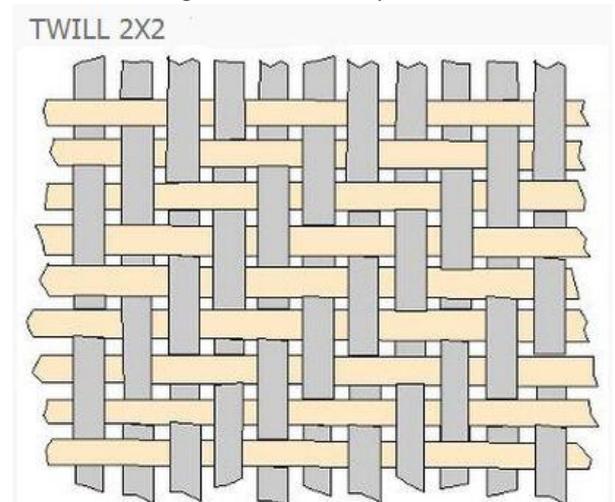
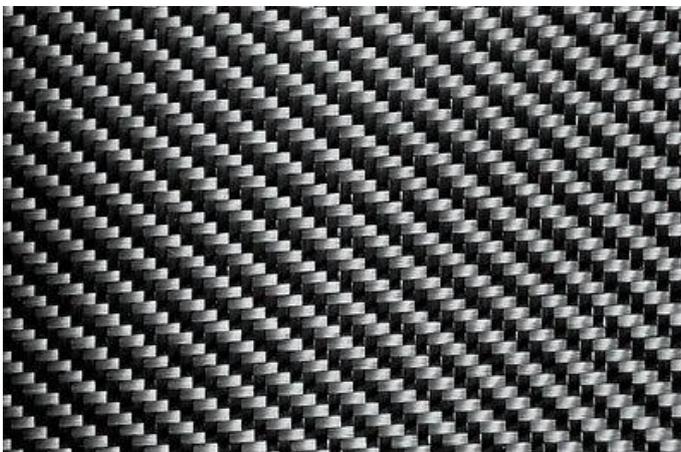
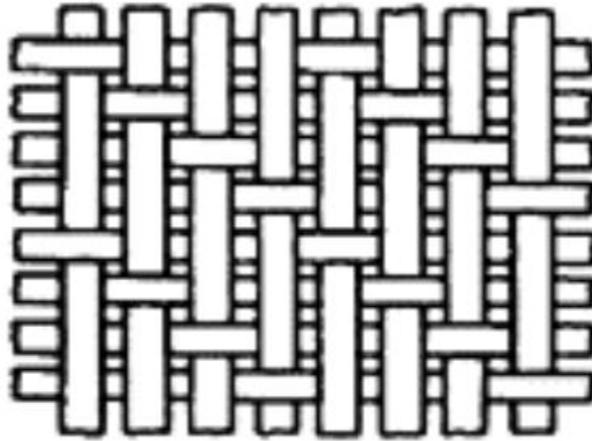


Figura 28. Representación de un patrón Twill 2x2 de fibra de carbono. (Fuente: ScienceDirect)

- c) **Los satens o Rasos (“crowfoot satin”)**, donde los hilos de la trama y de la urdimbre pasan primero por debajo o por encima, del primer hilo que cruzan, luego por encima o por debajo de tres, cuatro, siete o más hilos (hilos flotantes), y así sucesivamente.



Crowfoot satin

*Figura 29. Representación de un patrón Crowfoot satin.
(Fuente: ScienceDirect)*

4.4 Fallo de compuestos laminados

La falla de un laminado es normalmente un proceso de degradación gradual en el que pueden ocurrir muchos modos de falla. Con el fin de predecir correctamente la falla y diseñar elementos seguros el diseñador debe conocer muy bien cómo y cuándo ocurren estos mecanismos. Sin embargo, es difícil predecir, y aún definir, con precisión la falla de un compuesto laminado, para lo cual es necesario reconocer claramente con qué nivel de degradación (cuándo) falla el compuesto, cómo se desarrolla el proceso y dónde se produce.

Como se acaba de mencionar, es necesario saber cuándo falla el compuesto, es decir, cuál es el nivel de degradación inaceptable. Para esto hay que tener en cuenta si la estructura está cumpliendo la función requerida. Es claro que la estructura ha fallado cuando se ha fracturado “totalmente”, pero puede ocurrir que aunque ésta no haya fallado catastróficamente, los daños sean tan severos que ya no puede soportar las cargas de trabajo. Por otro lado, en algunos casos la estructura puede operar aceptablemente aún después de que hayan ocurrido fallas en algunas partes de los constituyentes del compuesto. Por ejemplo, cuando una lámina falla, no todo el laminado falla, y éste puede soportar todas las cargas de trabajo. Finalmente, cuando la estructura tiene una función decorativa, la falla podría definirse como una degradación de su apariencia, cuando se presentan grietas superficiales, una excesiva deflexión o una pérdida o fractura de una parte del elemento. Entonces, el nivel de degradación que debe asociarse con la falla depende de la aplicación y definirlo no es tarea fácil.

Además que definir la falla de un compuesto no es fácil, describir o predecir la falla es una tarea más compleja aún. El proceso de falla de un laminado consiste en una combinación de microfallas, cuya ocurrencia depende de muchos factores, tales como las propiedades de las

fibras, de la matriz, de la interfase (fibra-matriz) y de la interfaz (entre láminas). El proceso de fractura ocurre en una amplia variedad de modos de falla, como:

- La pérdida de adherencia entre fases (debonding).
- Deslaminación, que es la separación entre láminas y podría ser producida, por ejemplo, por esfuerzos cortantes o por el efecto de una grieta.
- Agrietamiento de la matriz.
- Pandeo local de las fibras.
- Rotura y extracción de las fibras. Dependiendo de la longitud de las fibras, éstas podrían ser despegadas y extraídas de la matriz o primero fracturadas (para ser extraídas posteriormente).

La ocurrencia de estos modos de falla depende de muchos factores. Algunos modos son provocados por la aparición de otros, y cada uno de éstos puede afectar el desarrollo de los demás. Los modos de falla se presentan también dependiendo del tipo de carga. Por ejemplo, la falla del laminado no es igual en tracción y en compresión. En tracción, las fibras fallan al ser quebradas, lo que puede conllevar a la fractura del laminado, mientras que en compresión la falla puede ocurrir por micropandeo. La resistencia de la lámina está muy influenciada por la orientación de las cargas con respecto a las fibras.

Otros problemas que aparecen cuando se trata de predecir la falla de un laminado es que en ésta intervienen aspectos como esfuerzos residuales térmicos (producidos durante el curado de matrices poliméricas), comportamiento no lineal y diferencias entre las propiedades de la lámina antes y después de ser embebida en el laminado.

En este proyecto, para la simulación se usará la **teoría de la deformación máxima**, la cual predice que la falla ocurre cuando alguna componente de deformación a lo largo de uno de los ejes principales del material es igual o mayor que el valor experimental de deformación correspondiente que produciría la falla.

4.5 Compuestos en automoción

A fecha de mediados de 2019, el uso de los automóviles supone un 12% del total de las emisiones de CO₂ en Europa, lo que hace que en la actualidad el sector del automóvil se enfrente a una legislación cada vez más restrictiva respecto a las emisiones de CO₂. Según diversos estudios, como [13], una reducción del 10% en el peso del vehículo se traduce en una mejora en el consumo del 7%. Esto hace que los materiales compuestos jueguen un papel relevante en el sector de la automoción porque permiten obtener productos con un reducido peso y con altas propiedades mecánicas y rigidez.

Uno de los materiales compuestos que está cada vez más integrado en la industria del automóvil es la fibra de carbono, también conocida como CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic). Los composites de fibra de carbono son entre **75-80% más ligeros que el acero y alrededor de un 30-40% más que el aluminio**. Debido a la complejidad de su proceso de elaboración y el elevado coste de los materiales, el uso de estos materiales se ha visto limitado durante años a los vehículos deportivos, pero el mercado se está abriendo a su introducción en vehículos de producción en serie. Esto se espera, en una escala global, que tenga un impacto significativo sobre el CO₂ liberado y el consumo de energía.

Hoy en día la fibra de carbono es utilizada en diferentes lugares del automóvil. Su uso puede ser **puramente estético** y no afectar al rendimiento, como en la fabricación de las carcasas de los retrovisores o las inserciones del interior. En otros casos se buscarán su ligereza y resistencia

para **mejorar su comportamiento dinámico**, como fabricando paneles de la carrocería de fibra de carbono, como el capó, el techo o en componentes aerodinámicos como alerones, difusores o deflectores de aire. También puede usarse en la fabricación del chasis, buscando aligerar el peso total mientras que se gana resistencia. Esta tendencia seguro que aumentará en el futuro aplicándose en nuevas zonas.

4.6 ELECCION DE FIBRA DE CARBONO Y TWILL 2X2

Analizando los motivos de la utilización de la fibra de carbono para el proyecto, encontramos que posee elevadas propiedades mecánicas (óptima resistencia a la tracción, buena resistencia a la compresión), elevado módulo de elasticidad, baja densidad, alta resistencia al impacto, elevada resistencia a altas temperaturas (a la temperatura del orden de 1500 – 2000 °C presentan hasta un incremento de sus prestaciones), coeficiente de dilatación térmica prácticamente nulo, impermeabilidad al agua, elevada resistencia a la corrosión, buena conductividad eléctrica y térmica, sensibilidad a la abrasión, bajo alargamiento a la rotura y resistencia a la fatiga excelente.

5. ENSAYO DE LAS PROBETAS

En este apartado, debo mencionar y agradecer la colaboración del equipo Formula Student de nuestra facultad ETSEIB por el trabajo conjunto en crear y ensayar probetas para obtener datos para la posterior simulación.

Inicialmente se dispuso de una estructura de 5 capas de fibra de carbono tipo Twill 2x2, orientadas simultáneamente a 0º y 45º del cual se extrajeron probetas para realizar ensayos, pero gracias a la ayuda de ESI GROUP (apartado 6) se descartó el uso de esta estructura ya que serían difícilmente extrapolable en la simulación las propiedades de cada lámina, y solo se podrían usar las propiedades del comportamiento homogéneo de la estructura; lo que quitaría libertad a las simulaciones en cuanto a la variación del número de las capas.

De esta manera, con la ayuda del Formula Student Etseib, se fabricaron nuevas probetas, también de fibra de carbono de tipo Twill 2x2. El caso ideal y más fidedigno para la extrapolación de las propiedades del material para la simulación es el ensayo de una sola capa, pero el ensayo a tracción de una capa es difícilmente ejecutable por posibles problemas de agarre de la probeta. Se decidió construir estructuras apiladas de 3 capas igual orientadas todas en la misma dirección. Los resultados son así equivalentes a una capa, al extraer las curvas de interés tensión-deformación, y posteriormente las propiedades del material deseadas.

El procedimiento de construcción de las probetas es relativamente sencillo, y se realizó íntegramente en el laboratorio del equipo de Formula Student de dicha facultad Etseib de la Universidad Politécnica de Catalunya. Este laboratorio cuenta con todo el material necesario y una sala limpia donde se procedió al corte del material y al proceso de apilado, con el fin de evitar la contaminación del material con partículas que pudiesen estar en el ambiente y pudiesen modificar las propiedades de las probetas resultantes.

El proceso consiste en cortar la fibra a la medida deseada, y apilar las diferentes láminas en la posición requerida, afianzando bien su unión con utensilios como una espátula, para que queden bien pegadas sin aire entre ellas. Posteriormente, introducimos la plancha con las tres capas en la bolsa de vacío con el fin de obtener un compactado más fuerte, la cual va unida a un compresor, y posteriormente se procederá al curado de la placa. Una vez está curada correctamente, se remueve del vacío y ya se tiene la fibra bien construida.

5.1 Ensayo a tracción

Una vez obtenidas las probetas, se dispuso a realizar el ensayo de tracción en el laboratorio de la facultad UPC Etseib, bajo la supervisión de un técnico especializado. Los ensayos a tracción permiten caracterizar las probetas y conocer el módulo y la resistencia a la tracción. Consisten en someter la probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Basándonos en la norma ASTM D-3039 para la realización de los ensayos, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Alineamiento de la carga: con objeto de evitar que la carga aplicada sobre la probeta provoque flexión en esta, la probeta se colocará totalmente perpendicular a la mordaza de la prensa que ejercerá la carga.
- Condiciones standard: la temperatura debe ser lo más cercana a 23+/-1ºC con una humedad relativa de 50+/-10%.

- La velocidad de carga se establecerá en 0.5mm/min. Debido a que la carga se va aplicando lentamente para que el material pueda absorber correctamente la deformación, el ensayo se puede considerar cuasi-estático (velocidad de deformación baja).

La máquina de tracción usada en el ensayo tiene una célula de carga de 10000 kg. El procedimiento consiste en colocar la probeta entre dos **mordazas** mecánicas de tipo cuña, que serán la sujeción de la probeta, y aplicar el esfuerzo axial de tracción con los parámetros de dimensiones correctos en la máquina. Cabe destacar que la longitud de la probeta, como se ha visto anteriormente, es de 200mm, pero con el agarre de las mordazas la superficie libre de la probeta en el ensayo es de aproximadamente 90 mm (los agarres cogen 55mm de probeta por cada extremo). Con la ayuda de dos **extensómetros**, ambos de longitud característica 10 mm, se miden las elongaciones tanto longitudinales como transversales a la dirección de ensayo, en función de la fuerza que se va aplicando gradualmente. Con la lectura y el tratamiento de estas magnitudes al acabar el ensayo, la curva tensión en función de la deformación puede ser trazada.

Antes de hacer el ensayo, uno se debe asegurar que el agarre será efectivo (tanto por el grosor de la probeta como por la fricción que oponga), y aún habiendo contrastado con el técnico de laboratorio que el grosor de 0,63mm era suficiente para un buen agarre en la máquina y una buena obtención de las medidas en el extensómetro lateral, en un primer ensayo no se pudieron obtener resultados debido a que el agarre no tenía la suficiente fricción y por consiguiente la probeta resbalaba. La solución que se procedió a aplicar fue añadir en las cabezas o extremos de las probetas una parte de un laminado llamado **Peel Ply**, un tejido rugoso que se aplica a la fibra de tal forma que una vez pegado al retirarlo produce un acabado rugoso en la fibra y consecuentemente una fricción suficiente para un buen agarre.

A raíz de los resultados obtenidos, se procedió a obtener los parámetros que permiten caracterizar el material, a fin de poder usarlos en la simulación del proyecto, que son: el Módulo de Elasticidad, la resistencia a tracción y el coeficiente de Poisson. En las siguientes Figuras se pueden observar los gráficos de Fuerza vs Desplazamiento del ensayo, y de Tensión vs Deformación obtenidos a partir de esos datos.

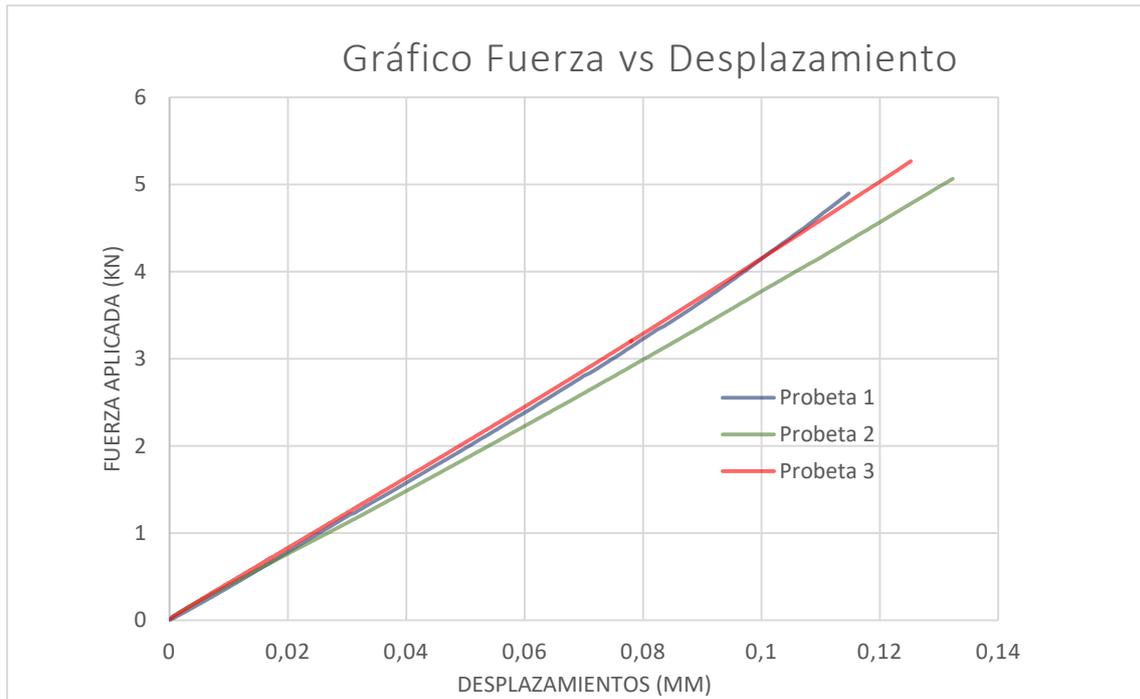


Figura 30. Gráfico Fuerza vs Desplazamiento de las probetas



Figura 31. Gráfico Tensión vs Deformación de las probetas

La tendencia de las tres gráficas es la típica del ensayo a tracción de un material compuesto. El comportamiento se traduce al de un material bastante rígido, por el que soporta una alta carga con poca deformación en la probeta, siendo también la deformación final a rotura de las tres probetas inferior al 1,5%. Se debe destacar que prácticamente no se tenían datos de plasticidad

ya que el comportamiento resultó muy lineal en todo el ensayo hasta la rotura, así que se consideró el comportamiento de las probetas solamente en régimen lineal.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, las probetas 1 y 3 tienen comportamientos altamente similares en cuanto a los desplazamientos con la aplicación de carga gradual, con la sola diferencia de una mayor resistencia a tracción para la Probeta 3. Esto puede ser debido a que quizás se dañó alguna parte de la fibra previa al ensayo por donde rompió antes. En cambio, observando el comportamiento de la probeta 2 se puede apreciar una menor rigidez destacable respecto las otras dos. Esto se podría deber a que había alguna diferencia de construcción en la zona de la placa de donde se extrajo esta probeta (se cogieron de distintas partes de una placa grande para ver que todas respondían al mismo comportamiento), como discrepancias dimensionales, o que los utensilios de ensayo como los extensómetros modificaron levemente sus dimensiones características y sus lecturas. Aún así, teniendo en cuenta que en un ensayo de este tipo siempre se tendrá cierta variabilidad, y considerando que la discrepancia de la Probeta 2 no es excesiva (alrededor del 15% en el valor del módulo de Young y del 6% en la deformación máxima promedios), se consideraron buenos los resultados de las tres probetas.

A continuación están los resultados de los respectivos valores del módulo de Young, la resistencia a tracción, los coeficientes de Poisson y la deformación máxima admitida en el ensayo, junto con los valores promedio utilizados en la simulación:

	UNIDADES	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	VALOR PROMEDIO
MÓDULO DE YOUNG	MPa	66156,49	50205,82	62052,64	59471,65
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	MPa	777,6	804,1	836,2	806
COEFICIENTE DE POISSON	Adimensional	0,09656	0.0852	0.0801	0,09
DEFORMACIÓN MÁXIMA	Unitaria	0,0115	0,0132	0,0125	0,0124

Cabe destacar que la probeta 3 se construyó de forma perpendicular en la placa a las otras dos, y las propiedades de esta son prácticamente iguales a las otras (más a la Probeta 1 que a la Probeta 2); por lo que se decidió simplificar y considerar el tejido usado de fibra de carbono como **isótropo a 0° y 90°**, de manera que $E_{11}=E_{22}$. De esta manera, también se facilitaban los cálculos para la posterior simulación debido a que si no hay un alto número de parámetros y tipos de caracterización del material en ella. Entonces, sería equivalente en la simulación apilar dos láminas a (0° y 0°), (0 y 90°) o (90° y 90°); pero no se puede considerar igual para las otras direcciones del plano.

6. ESI GROUP - PAMCRASH: Metodología de simulaciones numérica

ESI GROUP es un proveedor líder mundial de soluciones para realizar prototipos virtuales, que tiene en cuenta la física de los materiales. Lleva desde 1987, cuando supuso un gran avance en el mundo de la simulación, realizando análisis de “crash” y seguridad ante impactos de coche completo y componentes, con su producto Pam-Crash.

Pam-Crash es un código comercial de elementos finitos que permite la simulación de problemas de impacto en numerosas aplicaciones industriales, centrado mayoritariamente en la industria del transporte. Este ha sido ampliamente validado por la industria global mediante ensayos a escala real realizados en las industrias automovilística, ferroviaria y aeroespacial. Gracias a esta metodología de diseño basada en la simulación numérica por ordenador se ha logrado reducir enormemente la duración y los costes de los ciclos de diseño, además se ha reducido el número de prototipos necesarios para verificar el diseño final. Este está basado en las técnicas más avanzadas de cálculo numérico mediante el método de los elementos finitos explícito, además cuenta con una extensa librería de elementos y opciones que permite representar fielmente los modelos físicos que se deseen estudiar.

6.1 Información adicional funcionamiento interno de Pam-Crash

- La geometría del problema es discretizada mediante un preprocesador, dividiendo la misma en elementos interconectados en los nodos.
- Los desplazamientos son las incógnitas y son aproximados empleando funciones de interpolación, imponiendo continuidad en los nodos.
- A partir de los desplazamientos se obtienen las tensiones mediante la ley constitutiva del material.
- Es necesario imponer correctamente las condiciones de contorno y las condiciones iniciales para los problemas evolutivos.
- Se emplea una descripción Lagrangiana, es decir, el sistema de referencia acompaña al sólido en todo momento.

Es apreciable destacar la excelente **ayuda** proporcionada por el Servicio técnico de ESI GROUP siempre que se ha requerido al largo de este proyecto.

6.2 Análisis explícito

El análisis explícito es el más usado para problemas en los que se generan altas deformaciones en un intervalo de tiempo, como pueden ser los crash-test, cuyo propósito es resolver los estados de equilibrio dinámico del modelo. Esto es debido a la presencia de grandes no linealidades, las cuales el análisis implícito le resulta muy difícil de absorber. Se considera que se emplea un esquema de elementos finitos para la resolución del problema en el dominio espacial y un esquema de diferencias finitas en el dominio temporal, en las que se aplican fórmulas de derivación matemática.

7. FUNCIONAMIENTO DE LOS MODELOS

Un modelo de simulación es el conjunto de todos los elementos que conforman el sistema 3D del objeto que se pretende simular mediante los elementos finitos. Se incluyen tanto los elementos que constituyen la malla que le da forma al objeto: nodos y shells, como también se incluyen todas las propiedades de cada pieza, junto con su material. Asimismo, todos los elementos que simulan las uniones o los contactos entre piezas también se deben incluir, como los distintos que se usan para otras muchas propiedades necesarias para aproximar mejor el modelo de elementos finitos a la realidad y de este modo obtener resultados mucho más verídicos.

Normalmente, los modelos con más de un sistema se subdividen en pequeños modelos en los llamados **includes**, para así facilitar el manejo y los cambios a realizar de cada uno de ellos. Estos son archivos de texto, con extensión .inc en PAMCRASH, que pueden contener información de todo tipo: nodos, elementos, Shells, uniones, grupos y otros elementos del modelo. Cuando se importa el archivo el programa preprocesador ANSA, este lo procesa y lo traduce al modelo 3D creado anteriormente. La ventaja de trabajar con ellos es que se pueden realizar modificaciones puntuales directamente sobre el archivo de texto sin la necesidad de tener el modelo 3D cargado y volver a crear un archivo de texto actualizado. En el caso del proyecto, al tener un modelo reducido se trabajará con un solo include.

A continuación, se explican algunos elementos más comunes en la mayoría de modelos y que aparecen en el modelo de este proyecto. Cabe destacar que el trabajo con ANSA se puede realizar con diferentes códigos de cálculo comerciales, tales como ABAQUS, ANSYS y NASTRAN, en el que cada uno implica ciertas diferencias en la esquematización y tratamiento de los modelos; pero a continuación se explica con el código de cálculo PAM-CRASH usado en el proyecto.

7.1 GROUPS o Sets

Los Groups o Sets son solamente agrupaciones de nodos y elementos, o cualquier otra magnitud cuantificable y agrupable en el modelo, como sólidos o Solidfacets (caras de sólidos). Estos sirven para organizar el modelo y poder realizar más ágilmente la aplicación de Cargas y Restricciones directamente sobre todo el contenido del Set.

7.2 PROPERTY

Estas son agrupaciones de nodos o elementos, con la diferencia que contienen información del material y grosor. Con ellas, se puede asignar distintos materiales a distintas partes del modelo y obtener un buen grado de organización. En este proyecto son clave ya que estas contendrán la información del número de capas de material compuestos en cada zona del modelo.

7.3 Constraints

Las constraints son restricciones de distintos tipos que nos encontramos en el modelo. Puede haber una gran variedad de ellas pero en este proyecto solo nos interesan dos: los contactos y los Rigidbodies:

7.3.1 Contactos

Dentro de los contactos encontramos de diversos tipos con usos distintos. Para poder definir los contactos se deben generar los Groups o Sets de los elementos que queremos que lo conformen. Excepto en los contactos que actúan como auto-contacto, hay un criterio que se debe seguir para que estos funcionen correctamente: debe haber un grupo que haga de máster y otro de slave. El grupo máster suele ser el que contiene una superficie mayor para que el grupo de slave, con una superficie más pequeña, encuentre una proyección donde pegarse y generar el contacto o la unión, según el tipo que estemos usando. Muchas veces elegir y definir bien estos grupos determinan que el cálculo funcione o no, por lo que se debe tener en cuenta las características de los contactos que se quiera usar. Una vez hecho el contacto, se pueden distinguir los grupos de máster y slave ya que se ven azules y rojos en la simulación, respectivamente. Los principales contactos que tendrá el modelo tratado en el proyecto serán los siguientes:

- **Contacto C33** (Symmetric Node-to-Segment Contact with Edge Treatment):
Este contacto es de tipo simétrico entre dos superficies diferentes implicadas, con lo que ambas pueden actuar indistintamente tanto como superficie de contacto o superficie objetivo (master-slave). Su función es evitar que cuando interactúen se produzcan penetraciones entre ellas. Se necesitan dos grupos, que pueden estar en diferentes Includes, para su correcto uso.
- **Contacto C36** (Self-Impacting Node-to-Segment Contact with Edge Treatment):
Este es un auto-contacto entre una misma superficie o estructura cuando se prevé la presencia de grandes deformaciones durante el cálculo. Su función es hacer interactuar las piezas de la misma superficie y evitar penetraciones entre ellas. Se necesita de un solo grupo para su correcto uso. Este contacto solamente es válido para cálculos explícitos.

7.3.2 RBODY (Rigidbody)

Un RBODY (Rigidbody) es un elemento cuya función es modelizar uniones que no se describen en el modelo, como pueden ser uniones atornilladas o tipo bisagra. También se usa, como será el caso del modelo, para hacer totalmente rígida una pieza entera para ahorrar tiempo en la modelización y la simulación. Este elemento del modelo está compuesto por un nodo independiente (máster) que transmite, o bien restringe, fuerzas y momentos a unos nodos dependientes, los nodos slave. Para generar un RIGIDBODY se deben seleccionar los nodos que se desean fijar, o seleccionar un grupo que contenga dichos nodos. Con la definición de este, se genera un nodo padre que actúa como máster en el COG por defecto que también se puede definir manualmente. Este elemento permite la adición de masas e inercias en el modelo, de forma que modelizará una pared como una masa impactando.

7.4 Load

Los elementos tipo load definen las cargas y las condiciones de contorno del sistema. Entre otras condiciones de contorno que se pueden definir, estos son elementos muy importantes ya que determinan las acciones que recibirá el modelo, como las fuerzas externas que se aplican para hacer un estudio del modelo en un punto en concreto o por donde deberá ir fijado este o la presión que lo rodeará o la velocidad inicial de uno de los includes del modelo.

Generalmente, en las condiciones de contorno se debe determinar una dirección y un sentido. Mediante ANSA se pueden crear ejes locales según las necesidades y definirlos para la condición de contorno deseada. En caso de no precisar de un eje local, ANSA coge por defecto el eje global que aparece en la parte superior derecha del escritorio, por lo que es muy importante saber en todo momento con qué eje estamos trabajando para poder determinar la dirección y el sentido correctamente.

Para este proyecto solo hace falta fijarnos en dos de ellas: los boundaries y la initial velocity.

7.4.1 Boundary

Este elemento es una condición de contorno cuya función es fijar el desplazamiento en un nodo. Podemos fijar hasta seis grados de libertad: desplazamiento en X, Y, Z y rotación en X, Y, Z. En el preprocesador ANSA vemos estas condiciones traducidas como 123456 donde cada número corresponde respectivamente a los seis grados de libertad. Hay que tener en cuenta que cuando lo exportamos en texto los valores de fijación están en binario. Es decir, si queremos fijar el desplazamiento solo en Y y en Z y todas las rotaciones, en ANSA tendremos 23456 pero en el texto exportado para PAMCRASH leeremos 011111, donde el 0 es libre y el 1 es fijo.

7.4.2 Initial velocity

Esta condición de contorno da velocidad inicial a unos elementos en concreto. Primero hace falta definir qué será lo que se va a mover, ya sea a través de nodos o grupos, y una vez determinado se define la velocidad deseada y en qué dirección y sentido, siempre según el eje. En el caso de un impacto, como sucederá en el modelo, se aplicará una velocidad inicial a una estructura de impacto y se irá ralentizando por conservación de la energía por deformación en la estructura impactada. Es decir, no se tiene que confundir con una velocidad al largo de toda la simulación.

7.5 PLY

Este elemento es un factor clave en el trabajo con ANSA y materiales compuestos. La representación de las PLY's viene a ser la "definición" de las láminas de material compuesto que posteriormente se usarán en las Layers, que serán las láminas en si del material compuesto del modelo. Dentro de las PLY's, se define:

- La tipología de definición de la misma PLY, según las propiedades y características del material que se usará. Hay hasta 10 tipos de modelización de PLY, por lo que se tiene que realizar un buen estudio de cual aplicar.
- Un material, del cual se tiene que tener una correcta caracterización.
- Un criterio de fallo correspondiente al fallo de la lámina, de los cuales hay bastante variedad y se tiene que tener criterio para elegir el más idóneo al ensayo realizado y el material usado.

Cabe tener clara la diferencia entre Layer y PLY, ya que puede conducir a error en la modelización. Como se ha comentado, la PLY es la definición del tipo de lámina que se usará y la Layer es la aplicación práctica de ella en el modelo.

7.6 LANZADOR

El lanzador es un archivo de texto, en el caso de PAMCRASH con extensión .pc, que une a todos los includes necesarios para generar el modelo. También contiene información para el cálculo, dependiendo del lenguaje de cálculo vienen definidas unas u otras variables. En el proyecto se trabaja con PAMCRASH, por lo que las variables son para este lenguaje. La cabecera del archivo

8. SIMULACIONES

En apartados anteriores, se ha explicado la gran variedad de formas y tamaños que pueden tener los Defos, ya que no hay una base teórica sólida y única en cuando a su comportamiento en Crash, y sus geometrías son muy sensibles a cambios de los parámetros característicos de cada modelo de automóvil.

El ensayo de la simulación del proyecto será relativamente sencillo: consistirá en el impacto de una pared rígida que tendrá una masa concreta, llamada impactor, contra el Defo a una velocidad inicial impuesta; para así poder ver el colapso de la estructura y poder “jugar” a cambiar el número de capas de cada parte del Defo o la misma geometría. El comportamiento que se espera es uno típico de un material compuesto como es un tejido de fibra de carbono, y se pretenden obtener magnitudes de parámetros descriptivos para observar las diferencias entre los diferentes ensayos o simulaciones.

8.1 Geometría

Para este proyecto, se ha decidido el uso de una geometría sencilla de un tronco de cono, de forma piramidal, sin la presencia de buñas o abulladuras. El tamaño es extrapolable a una real usada en automoción en turismos actualmente del mercado, pero de forma similar a los Crashbox usados en las áreas de coches de carreras de competición como Formula Student, debido a su mejor construcción real con geometrías sencillas. En la fase de creación de la geometría, esta se modificó de tal manera que en las esquinas del área superior hubiese un suavizado, para un mejor posterior cálculo, aunque se ensayaron diferentes tipos de geometría al largo de los ensayos. Las dimensiones corresponden a 180 de altura, y las bases de 100x65 mm la superior y 210x245 mm la inferior. La siguiente figura representan la geometría del Defo:

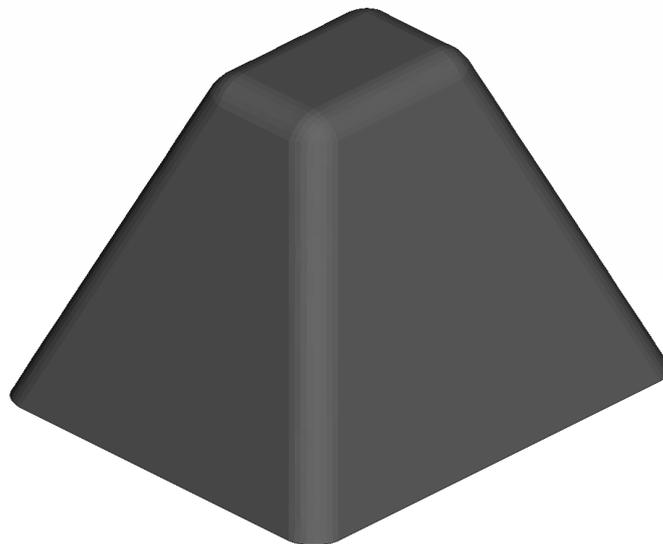


Figura 33. Geometría del Defo usado. (Fuente: propia)

8.2 Mallado

Una vez adquirida la geometría, se tiene que mallar siendo coherente con los criterios usados, y un hecho básico a la hora de mallar, es que la malla “*Tiene que entrar por los ojos*”. Hay parámetros muy importantes que determinan la optimización y calidad del cálculo, como son el

tipo y el tamaño de elementos usados. El mallado consistirá en un mallado superficial de una Shell, elemento plano sin grosor o “cáscara”, al que posteriormente se le asignarán unas Properties que contendrán la información del número y grosor de las capas usadas, y del material del que estén compuestas. De esta manera, los distintos elementos según la Property usada podrán tener diferente grosor, dato que usará el programa para el cálculo.

La teoría básica de mallado sostiene que se tiene que maximizar en la medida que se pueda el número de elementos Shell de tipo **Quad**, elementos de 4 lados, ya que son más óptimos para el cálculo debido al funcionamiento de las funciones de interpolación y la admisión de gradientes de los parámetros calculados al largo de ellos. Sin embargo, en prácticamente todas las ocasiones, si las geometrías no son totalmente cuadradas o rectangulares, se produce la introducción de elementos tipo **Trias** para poder realizar la malla, elementos de 3 lados, de forma triangular. Estos últimos son menos eficientes para el cálculo ya que no admiten las funciones de interpolación utilizadas en el cálculo, actuando como un elemento totalmente rígido, a diferencia de los Quads, y por ejemplo, teniendo un valor de tensión constante al largo del elemento. En las simulaciones se verá que estos elementos romperán antes que los Quads en muchos casos. La presencia de estos últimos se admite, en condiciones normales, hasta un porcentaje determinado, que suele ser del 10% en piezas grandes, siendo del 1,3% en este caso. Es destacable comentar que en Piezas 3D de geometrías medianamente complejas se admiten los Trias de 2º orden, sólidos, para sólidos rellenos.

A fin de tener un comportamiento simétrico al largo del Defo, se ha mallado un cuarto de la geometría deseada para, aplicando una simetría, poder extruir todo el Defo. En la siguiente figura se puede observar el Defo mallado desde diferentes perspectivas:

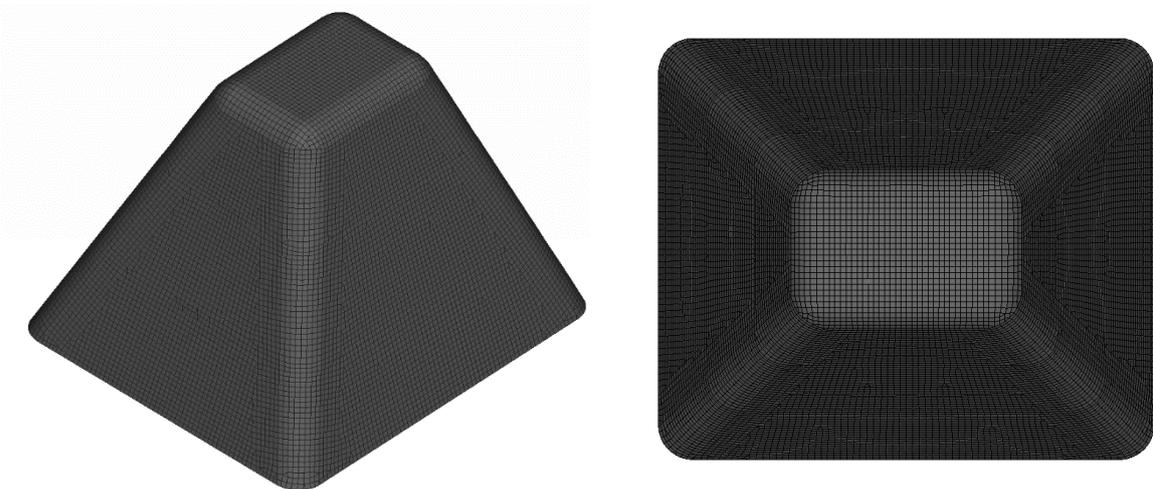


Figura 34. Malla del Defo usado.

(Fuente: propia)

Se debe comentar que se usaron técnicas de arreglo del mallado de forma que se direccionaran los elementos de ciertas partes, como son las esquinas de unión de las caras y la parte superior, evitando en la medida posible la presencia de Trias. En todo momento, aunque la geometría también es relativamente sencilla, se cumplieron unos criterios de validación de los elementos,

de magnitudes usadas en automoción en este tipo de piezas, llamados Quality Criteria en Ansa. Los diferentes criterios se basan en errores que puedan dificultar el cálculo a nivel de ángulos, Aspect, Swuekness, etc; y también se puede observar el porcentaje de dichos elementos Trias respecto a la totalidad de los elementos.

8.3 Modelización

Este apartado es explicativo de los detalles técnicos usados en la simulación, los cuales se han tenido que estudiar bien para tener una correcta modelización del modelo.

8.3.1 Properties, PLY y materiales

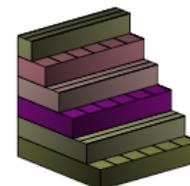
Como se ha comentado anteriormente, en la modelización es clave el correcto uso de las Properties, ya que estas contendrán la información de las capas o LAYERS y el grosor total de las láminas usadas. Para cada parte del modelo en el que se quiera variar de forma concreta dicho número o orientación de las capas se deberá asignar una Property diferente en el modelo. Citadas Properties tienen capacidad de admitir un alto número de capas, y se caracterizan porque en cada capa el usuario tiene la libertad de asignar a qué PLY corresponde, el grosor y la orientación; pudiendo también crear tejidos en las orientaciones que se desee en la simulación a partir de dos láminas diferentes. El comportamiento de la estructura si se usan dos láminas sobrepuestas por ejemplo de fibra unidireccional o un tejido de una sola lámina, no tiene por qué ser el mismo. En el caso particular del proyecto, debido a que se ensayaron las propiedades mecánicas de un tejido ya creado, se ha modelizado como **una sola lámina** correspondiente a “el conjunto tejido”. El material tendrá una densidad de $345 \text{ g/m}^2 = 3.45 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^2$.

En cuanto a los materiales y las PLY, ambos contienen información del material usado en la simulación y tienen un criterio de fallo definido. El criterio de fallo usado en las PLY ha sido por deformación máxima, usando el valor medio de 0.0124 obtenido en los ensayos. De esta forma, la lámina se considerará rota si se obtiene este valor de deformación. En cambio, en el concepto de material del programa se usará un criterio de fallo por el que si en un elemento, el cual puede tener diferentes láminas a diferentes orientaciones, rompen el 75% de las capas apiladas se desintegrará el elemento. Pongamos por ejemplo que si un elemento de una zona del Defo tiene 4 láminas y por el impacto rompen 3 de estas láminas, el elemento se desintegrará y dejará de formar parte de la simulación, ya que tampoco aportaría nada a la simulación. Así se conseguirá un resultado más realista al comportamiento de la fibra, la cual sea por el tipo de fallo que sea, se colapsa y se descompone.

A continuación podemos observar en la Figura 35 la información extraíble de un elemento. Este elemento tiene un total de 6 capas o Layers las cuales todas llaman a la PLY 1, y tiene orientaciones alternas a 0° y 90° , con un grosor total de 1.26mm:

Total shell thickness: 1.26
Reference plane: Middle surface
Symmetry: None

Layer 1: thick: .20999999344, angle: 0., ply:	1 PLY TFG, name:
Layer 2: thick: .20999999344, angle: 90., ply:	1 PLY TFG, name:
Layer 3: thick: .20999999344, angle: 0., ply:	1 PLY TFG, name:
Layer 4: thick: .20999999344, angle: 90., ply:	1 PLY TFG, name:
Layer 5: thick: .20999999344, angle: 0., ply:	1 PLY TFG, name:
Layer 6: thick: .20999999344, angle: 90., ply:	1 PLY TFG, name:



0/90/0/90/0/90

Figura 35. Información contenida en un elemento cualquiera de apilado (Fuente: propia)

8.3.2 Defo e impactómetro

Para el impacto de la pared contra el Defo, se ha definido un RIGIDBODY en todos los elementos del impactor de manera que rigidice la estructura e impacte correctamente contra el Defo. Este elemento permite la adición de masas e inercias. Después de ensayar con diferentes valores de masa y velocidad, se ha decidido asimilar el impactómetro como una masa de 20kg, a $5 \text{ m/s} = 18 \text{ km/h}$. Con estos valores de masa y velocidad, teniendo en cuenta el tamaño del Defo y que se ensayaba directamente a impacto sin conjunto de ninguna otra estructura, se obtuvieron valores razonables y asimilables de deformaciones. Las inercias en este caso no tienen un significado real debido a las condiciones de contorno impuestas en el impactor, que solo tiene libertad de movimiento en la dirección del ensayo. Las condiciones de contorno aplicadas en el Defo son la fijación de la base, y en el impactor la restricción del movimiento en solo la dirección de avance. Se han definido el autocontacto C36 entre el mismo Defo y el contacto C33 entre defo-impactor.

8.4 Objetivo

La fabricación de este tipo de Defos se realiza con un molde donde la parte de contacto con el molde será la externa del Defo, consiguiendo de esta manera una buena estética. En su construcción, al largo de la dimensión del Defo el número de capas de material compuesto puede variar según qué parte interese a uno reforzar más a o menos, como en referencia al ensayo en [8]. De esta manera, con el conjunto de estas simulaciones y gracias a la libertad de simulación que dotan, inicialmente se empezará por un tipo de estructura de pocas capas y fácil composición, no muy diferente al largo del Defo, y posteriormente se harán más simulaciones modificando el número y la orientación de dichas capas para direccionar el colapso de la estructura hacia la dirección deseada, y sacar valores de magnitudes cuantificables.

En la Figura tenemos un ejemplo de una estructura similar a la de estudio después de ensayar, con unas condiciones muy similares a las de la simulación, pudiendo observar el tipo de deformación que se produce, y al lado una foto de la simulación:



Figura 36. Malla del Defo usado.
(Fuente: [2])

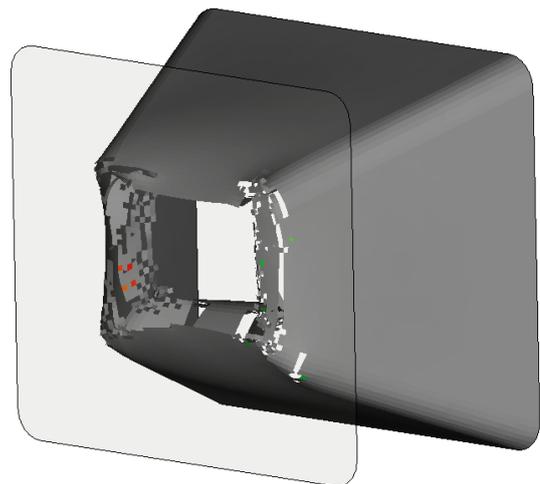


Figura 37. Simulación del ensayo a impacto
(Fuente: propia)

8.5 ENSAYOS

Las condiciones de impacto fueron establecidas como una masa de 20kg impactando a $5\text{m/s}=5\text{mm/ms}=18\text{km/h}$, justificado en el **Apartado 8.3.2**. La estructura general del análisis de los diferentes impactos consistirá en balances de energía, diferenciando entre energía total, cinética y interna de deformación; e información sobre las intrusiones, aceleraciones y fuerzas de pico debido al impacto, fuerzas de sección, eficiencias y imágenes de la deformación de la estructura.

Cabe destacar que las unidades usadas en la simulación son las siguientes:

Tiempo	ms	Fuerza	kN
Masa	kg	Tensiones	GPa
Distancia	mm	Densidad	Kg/mm^2
Temperatura	K	Energía	$\text{kN} \times \text{mm}$

En este tipo de problema que implica un cuerpo libre (el impactor) impactando una estructura deformable “elasto-plásticamente”, es posible comprobar la estabilidad de la solución. En este caso, según el Teorema de la conservación de la energía, toda la energía que correspondía a la energía cinética del impactor es convertida en energía interna plástica en la estructura. De esa forma, la energía total del sistema (cinética y interna) durante el impacto tiene que mantenerse constante ya que no hay ninguna adición o sustracción externa de energía del sistema. Si hubiese algún tipo de inestabilidad numérica, se mostraría en un posible incremento o decremento de la Energía total del sistema.

8.5.1 GRÁFICAS

La tendencia en las gráficas, variando las magnitudes, es altamente similar, por el que para no ser recurrente, se mostrará el comportamiento de un ejemplo, y más adelante si hay particularidades se tendrán en cuenta. El ejemplo corresponde al apilado de 6,8 y 10 capas desde la parte superior a la inferior respectivamente. Se podrá ver que el impacto no se produce en el instante 0 ya que se ha dejado una distancia suficiente para que en el primer incremento de tiempo aún no se esté realizando el contacto y no haya dificultades numéricas de cálculo:

El **desplazamiento** es medido en el nodo central del impactómetro, que al ser rígido se puede identificar como la intrusión que se producirá en el Defo. Cuanto más rígido sea el comportamiento global del Defo, menos intrusión habrá, y viceversa. Se puede observar que la tendencia en el desplazamiento del impactor es lineal hasta llegar al punto de retorno, en el que, debido al tipo de ensayo ideal de la simulación y la no rotura de todos los elementos del Defo, se devuelve parte de la energía cinética al impactor y se empuja hacia la otra dirección. Se ha estimado el tiempo de simulación hasta poder observar resultados coherentes, que se estableció inicialmente en 50 ms aunque según los casos con un valor inferior era suficiente:

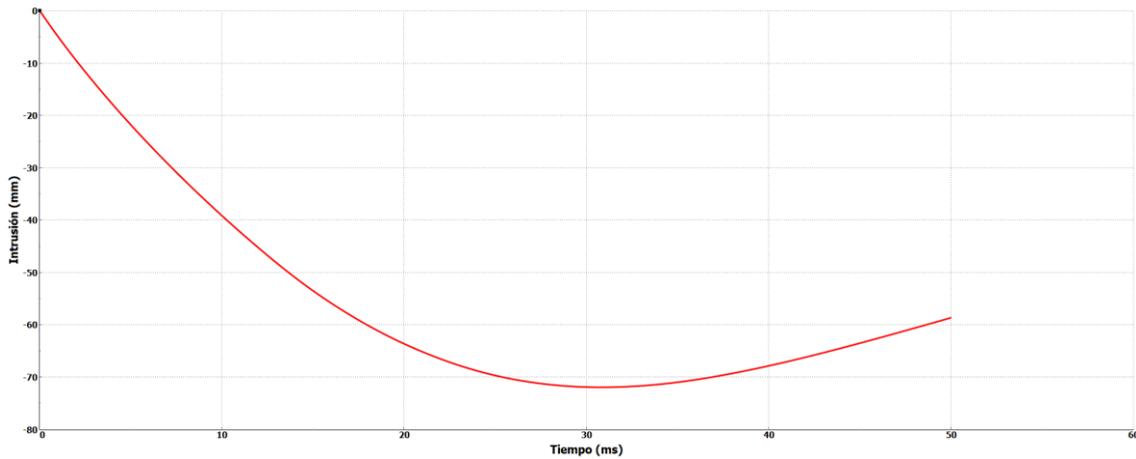


Figura 38. Gráfica Intrusión vs Tiempo simulación
(Fuente: Propia)

La **velocidad** del impactor empezará siendo negativa, debido a su dirección de desplazamiento, llegará a 0 porque se frenará cuando el Defo haya absorbido toda la energía de impacto y luego será positiva debido a que irá hacia la dirección contraria de inicio:

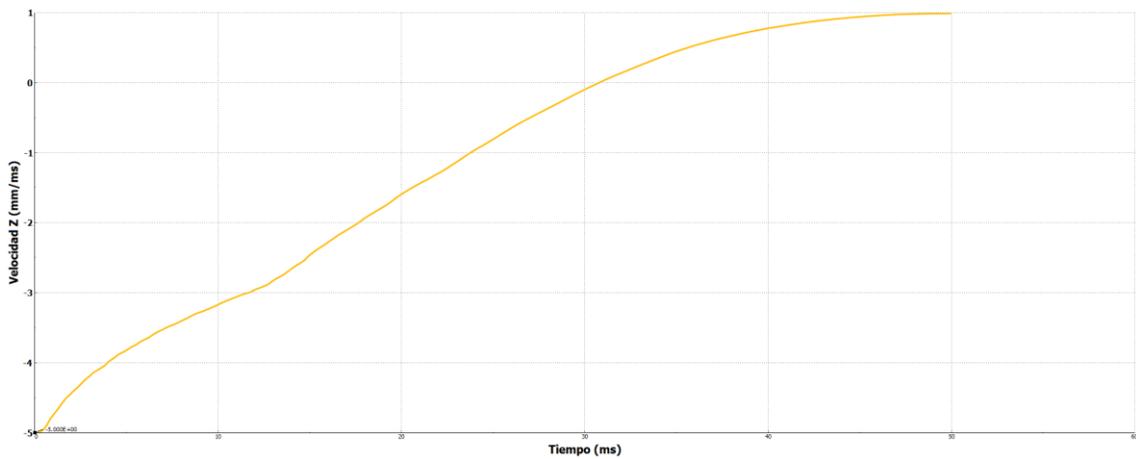


Figura 39. Gráfica Velocidad vs Tiempo simulación
(Fuente: Propia)

En cuanto a la **aceleración**, al principio se observa un valor nulo porque el impactor empieza con una velocidad inicial constante sin ningún impedimento. En cuanto encuentra el DEFO y choca contra él, se ve que hay una fuerte desaceleración que conlleva un pico de fuerza muy alto, con la posterior desaceleración gradual consecuente:

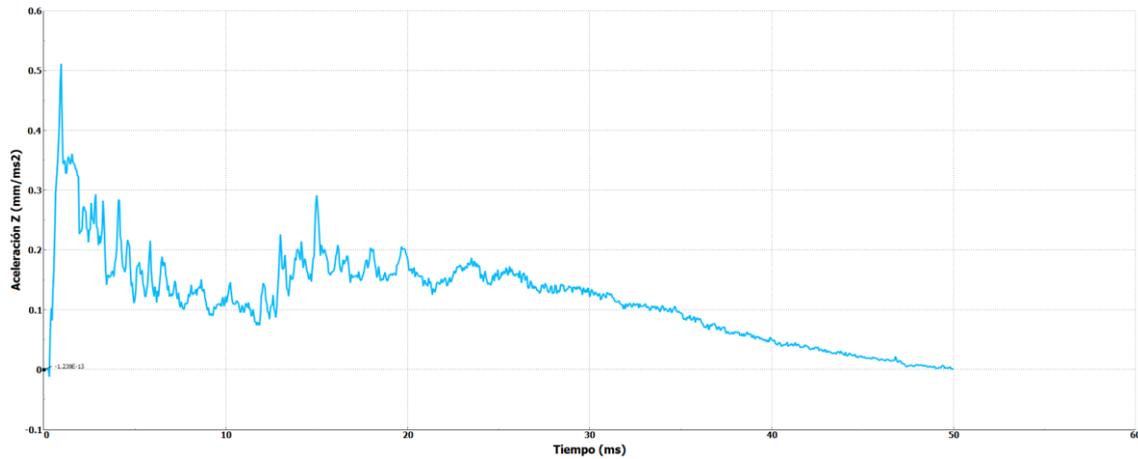


Figura 39. Gráfica Aceleración vs Tiempo simulación
(Fuente: Propia)

En el **balance global de energías** se observará en todas las gráficas que la energía cinética empezará siendo máxima y disminuirá hasta llegar a un punto (no 0) donde se mantendrá constante hasta al final. Esa tendencia de mantenerse constante y no llegar al 0 es debido a que al eliminarse elementos habrá partes (conjuntos de elementos o elementos solos) del modelo que quedarán sueltas y tendrán una velocidad y su consecuente energía cinética. En la segunda fotografía se puede ver la evolución de la energía cinética solamente del impactor, la cual debido a que llega al punto de frenado con el Defo, sí llega a 0 y posteriormente vuelve a aumentar porque rebota. En cuanto a la Energía interna correspondiente al Defo, vemos que va aumentando debido a que se va deformando a consecuencia del impacto:

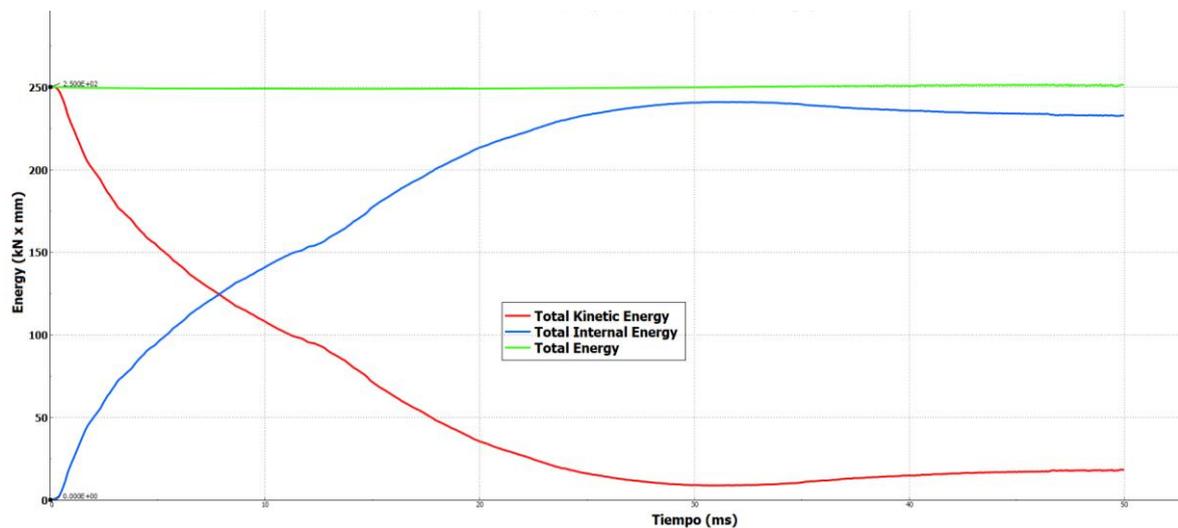


Figura 40. Gráfica Energías vs Tiempo simulación
(Fuente: Propia)

El estudio de las **fuerzas de sección** será importante para estudiar el impacto inicial y la eficiencia de las fuerzas de aplastamiento. El comportamiento de estas mostrará la resistencia que oponga

el Defo a deformarse. Graficando las fuerzas de sección en función del desplazamiento o intrusión del Defo, en la primera imagen llama la atención que tenemos dos valores de fuerza para el mismo desplazamiento en la zona del final. Eso es debido al retroceso del impactor una vez el Defo ya ha absorbido toda la energía y ha hecho “rebotar” el impactor. En la segunda, se han acotado los valores de desplazamiento hasta el punto que el impactor rebota y corresponde al valor de intrusión máxima, para poder calcular correctamente el área bajo la curva. Del gráfico, serán importantes los parámetros de la Fuerza de pico o $F_{m\acute{a}x}$, y la Fuerza media de aplastamiento, para el cálculo de la eficiencia de las fuerzas de aplastamiento (Apartado 3.2.3).

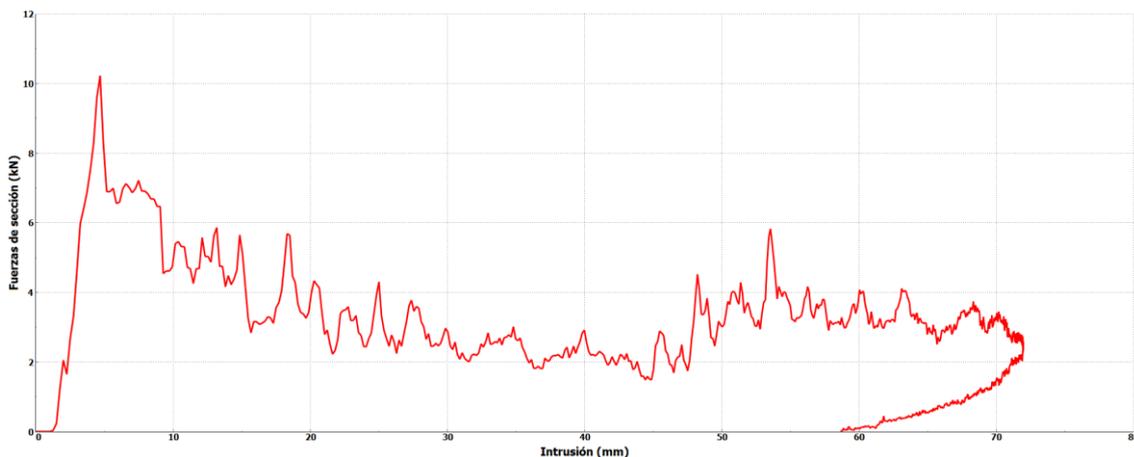


Figura 41. Gráfica Fuerzas de sección vs Intrusión
(Fuente: Propia)

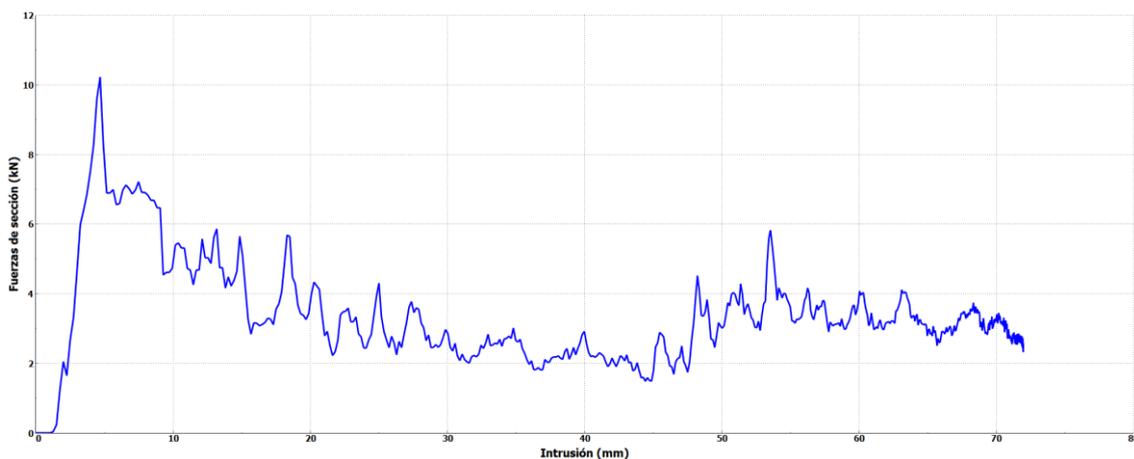


Figura 42. Gráfica Fuerzas de sección vs Intrusión
(Fuente: Propia)

Debido a la variedad de simulaciones se realizará una clasificación según su tipo. Como se podrá apreciar en las tablas que se plasmarán dentro de cada tipo, los parámetros que se tendrán en cuenta son la intrusión, para ver como de rígida es la estructura y cuanto permite al impactor introducirse “dentro el Defo”, la aceleración de impacto (medida en G, unidad utilizada en choques de Formula1 y Formula Student), las fuerzas de pico y media del gráfico fuerza-

desplazamiento, y la cuantificación de la eficiencia de las fuerzas de aplastamiento del Defo (CFE), explicada en Apartado 3.2.4.

Se tendrá que determinar unos valores límite para la intrusión máxima a partir de los cuales se estaría en un rango de valores erróneo ya que el Defo se requiere que no tenga una penetración de su longitud total. El valor de penetración se ha establecido que no sea superior al 60% de la longitud total del Defo (108 mm) en el proyecto, de manera que no se pudieran dañar elementos de su alrededor, pero en los cálculos reales de automóviles es muy variable dependiendo de su forma, tamaño y geometría; que vendrán condicionados por los elementos de su alrededor.

8.5.2 3 Zonas diferentes de laminado

Estos ensayos fueron los primeros que se realizaron para estudiar el comportamiento del Defo. Tienen tres zonas con un apilamiento diferente de láminas, dividiendo el Defo en tres partes: superior, medio e inferior; para así activar la falla progresivamente. Los apilados se nombrarán en ese orden comentado. La división de las capas se hizo a una altura de 60 mm entre ellas, de forma que los valores de intrusión por debajo de ese valor indicant que no se han superado esa primera capa. En la siguiente Figura 43 se puede ver la geometría del Defo dividida en tres, por Properties, con sus grosores en el caso de un apilado de 6-8-10 capas:

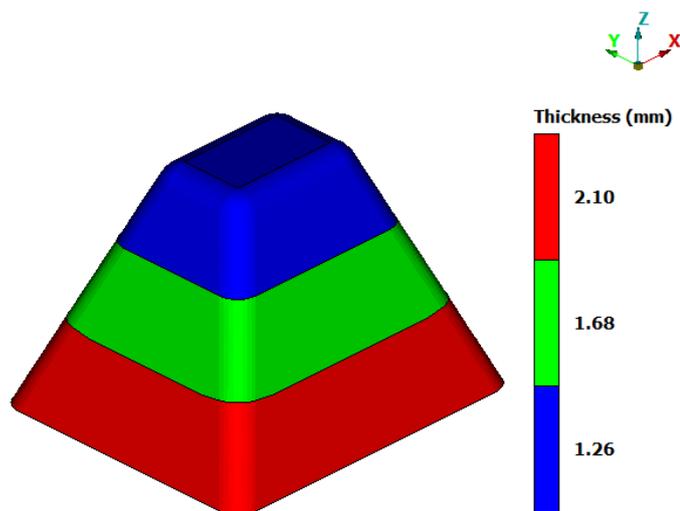


Figura 43. Representación del repartimiento de grosores en Defo (Fuente: Propia)

Los resultados de los diferentes ensayos son:

3 zonas diferentes	Intrusión (mm)	Aceleración de impacto (G)	Fuerza de pico (kN)	Fuerza media (kN)	% Eficiencia de aplastamiento
Patrón 2-4-6	117,7	36,76	7,35	2,51	34,15
Patrón 5-6-8	71,96	51,1	10,22	3,22	31,55
Patrón 6-7-9	57,86	63,3	12,66	4,03	31,85
Patrón 6-8-10	57,79	63,02	12,6	3,88	30,76
Patrón 7-8-10	48,28	78,56	15,71	4,08	25,95

La tendencia es lógica: cuantas menos capas tengamos en la parte superior del Defo, más se suavizará el impacto inicial, con una fuerza de pico menor, pero comportará una mayor intrusión del Defo. El primer patrón no está dentro del umbral predefinido de intrusión, aunque es el que tiene mayor eficiencia y un impacto más suave, por lo que se tendría que comprobar si ese valor de intrusión dañaría algún elemento en particular. En las siguientes imágenes podemos observar las fuerzas de sección en función del desplazamiento y el momento de la deformación del Defo, en dos instantes distintos de la simulación para el caso del Patrón 2-4-6. Se puede observar que en este caso el pico de fuerza se da al impactar con la segunda zona de apilados:

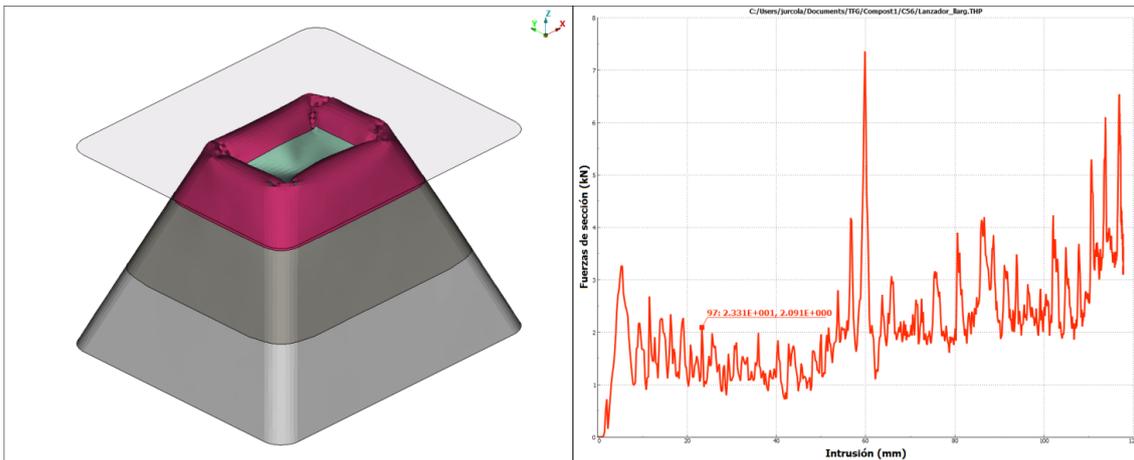


Figura 44. Simulación del ensayo del Defo con Patrón 2-4-6
(Fuente: Propia)

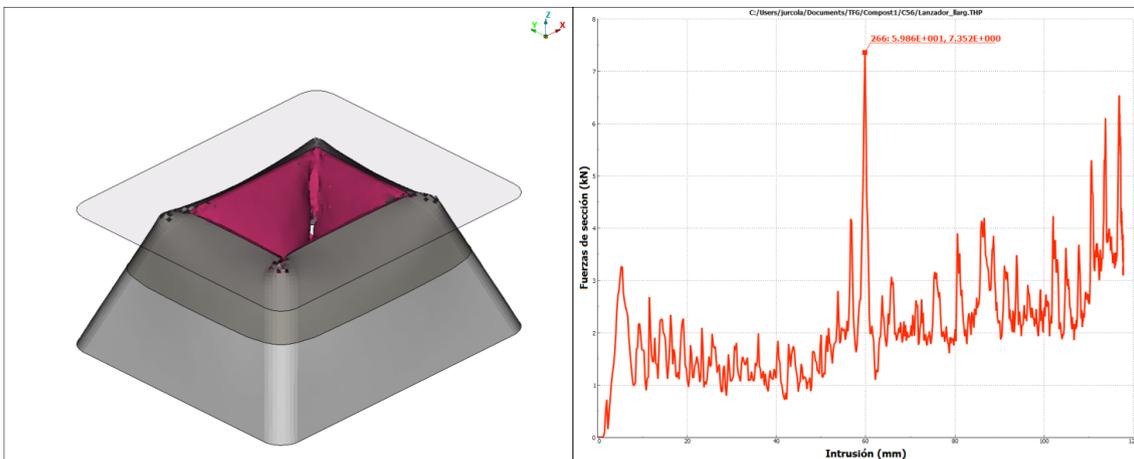


Figura 45. Simulación del ensayo del Defo con Patrón 2-4-6
(Fuente: Propia)

8.5.3 Grosor homogéneo

Esta clasificación se ha realizado imponiendo un grosor homogéneo al largo de todo el Defo. Como se ve en la tabla resumen, los grosores usados han sido de 10, 8, 6, 4 y 3 capas, estudiando todos los parámetros anteriores también:

Grosor homogéneo	Intrusión (mm)	Aceleración de impacto (G)	Fuerza de pico (kN)	Fuerza media (kN)	% Eficiencia de aplastamiento
Grosor 3 capas	101,2	27,66	5,53	2,43	43,94
Grosor 4 capas	102,5	36,68	7,338	2,30	31,40
Grosor 6 capas	63,51	63,58	12,72	3,18	25,02
Grosor 7 capas	48,28	83,07	16,61	4,41	26,55
Grosor 8 capas	42,04	88,2	17,76	5,08	28,60
Grosor 10 capas	27,05	130,8	26,16	6,31	24,10

La tendencia es que menos números de capas se traduce en más intrusión y menos fuerza de pico inicial, debida a una menor rigidez de la estructura en el impacto, lo que se traduce a una mayor CFE. Todos los valores de intrusión son aceptables dentro del umbral establecido, por lo que el primer apilado es el más óptimo: tiene un impacto inicial menor, sometiendo a una aceleración de impacto menor, y consigue la desaceleración del impactador a una fuerza media menor. A continuación se puede observar los gráficos de las fuerzas de sección juntamente con los desplazamientos y la deformación del primero de los apilados:

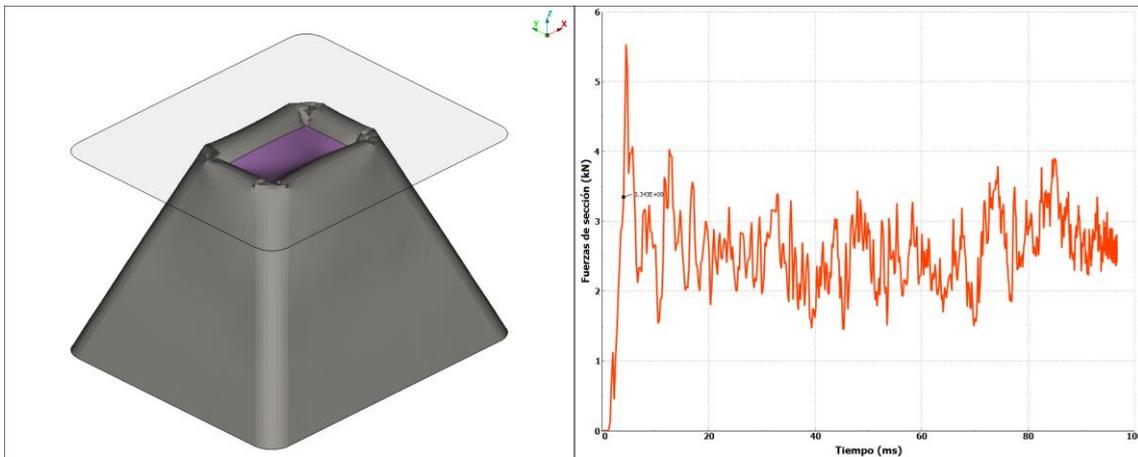


Figura 46. Simulación del ensayo del Defo con 3 capas
(Fuente: Propia)

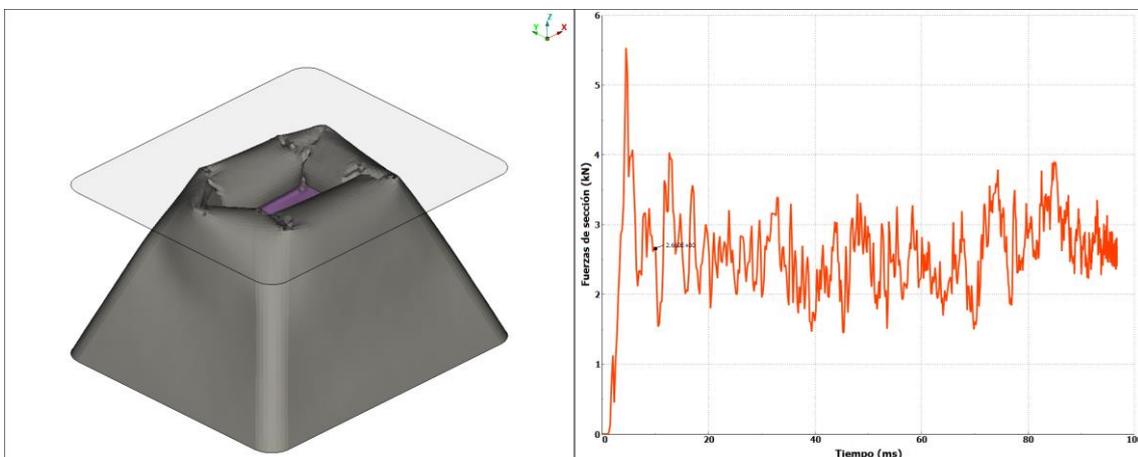


Figura 47. Simulación del ensayo del Defo con 3 capas
(Fuente: Propia)

8.5.4 Otros

Este apartado contiene alternativas que se han ido realizando al ir viendo las zonas de colapso de la estructura, tales como refuerzos o cambios en la geometría, ambos de la parte superior. Con ellos se han visto comportamientos diferentes de rotura y en cuanto a las eficiencias e índices de absorción. En la tabla quedan representados los parámetros:

Otros	Intrusión (mm)	Aceleración de impacto (G)	Fuerza de pico (kN)	Fuerza media (kN)	% Eficiencia de aplastamiento
Refuerzo superior	50,3	71,94	14,39	4,29	29,81
Sección tapa recta 2-4-6	119,6	80,85	16,17	2,50	15,46
Sin tapa	71,78	61,39	12,28	3,89	31,68

A continuación se presenta el ejemplo del modelo con refuerzo en la parte superior del Defo, donde se ve que el pico de fuerza máximo se concentra en el primer impacto, produciendo una rotura diferente del Defo y una intrusión bastante inferior:

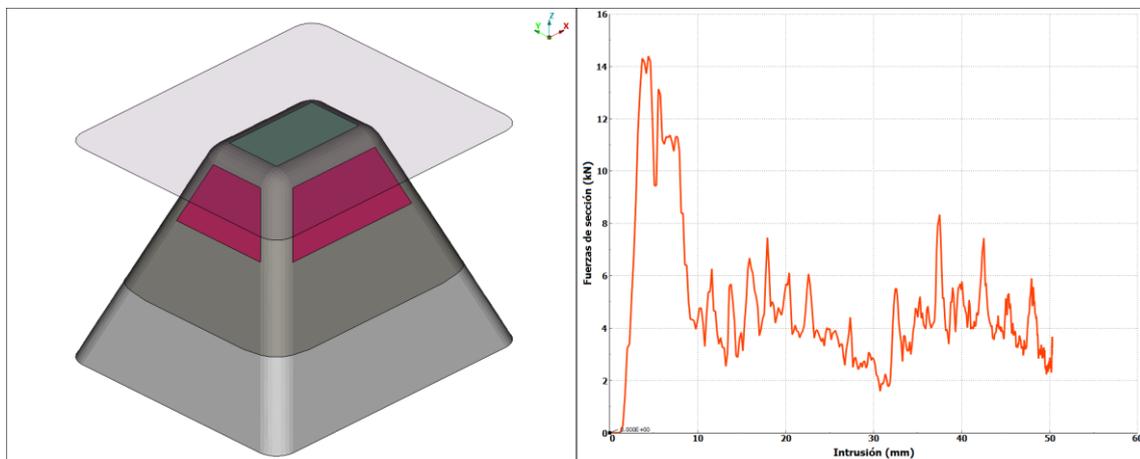


Figura 48. Simulación del ensayo del Defo con refuerzo
(Fuente: Propia)

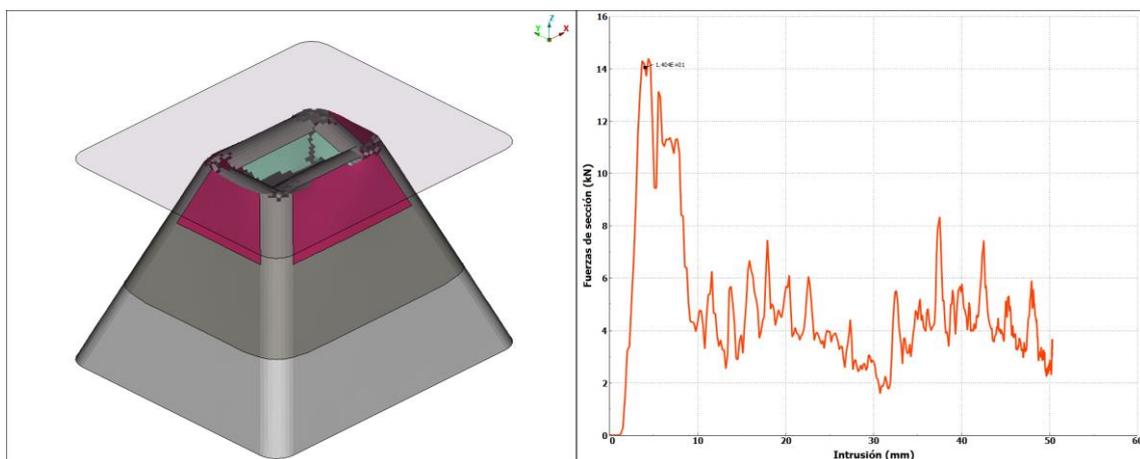


Figura 49. Simulación del ensayo del Defo con refuerzo
(Fuente: Propia)

8.5.5 Acero

Se ha comparado también los resultados con el mismo Defo pero compuesto de acero, estipulando, a partir de pruebas, grosores del acero a partir del cual las intrusiones sean de un orden parecido al del Defo de material compuesto. Se puede observar que con un ligero incremento del grosor se obtienen valores bastante diferentes de intrusión, y la eficiencia está por encima de los compuestos, debido a su inferior fuerza de pico comparado con su mayor fuerza media:

Acero	Intrusión (mm)	Aceleración de impacto (G)	Fuerza de pico (kN)	Fuerza media (kN)	% Eficiencia de aplastamiento
Acero 0.15 mm	80,53	25,48	5,09	3,096	60,825
Acero 0.2 mm	56,5	38,72	7,74	4,49	58,010
Acero 0.25 mm	39,95	54,74	10,96	6,51	59,398
Acero 0.3 mm	28,62	75,13	15,03	9,12	60,679

A continuación se presenta un gráfico con los comportamientos de dos Defos con intrusiones finales similares. Vemos que el de acero tiene un pico inferior pero una fuerza media superior, por el que será más eficiente y absorberá mayor cantidad de energía.

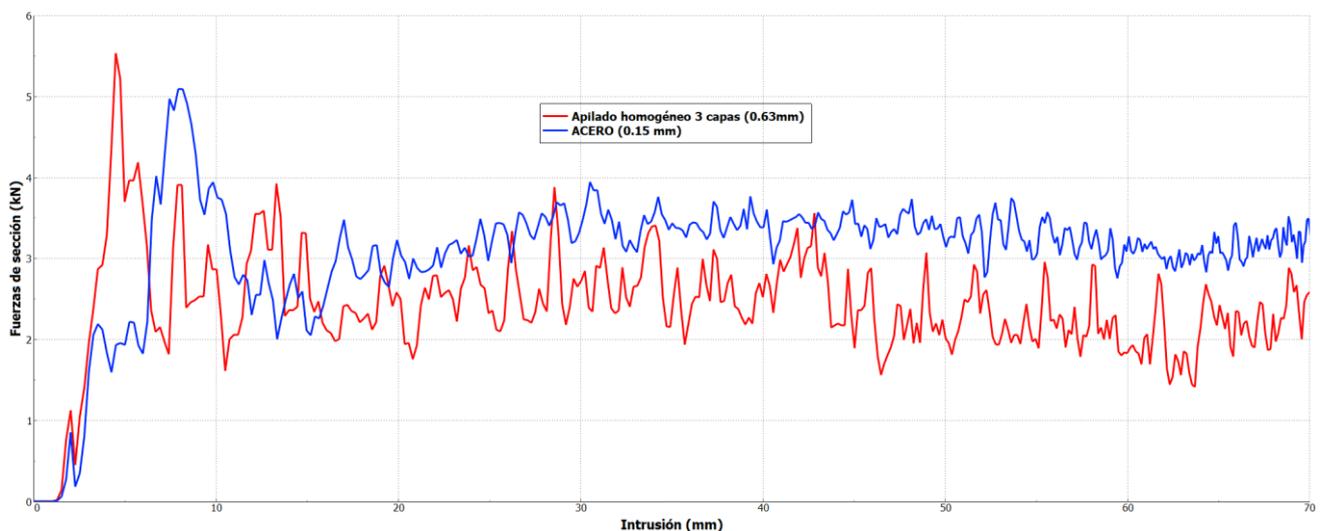


Figura 50. Comparación gráfica entre acero y compuesto
(Fuente: Propia)

9. RESULTADOS

El resumen de los resultados de las anteriores simulaciones queda representado en la siguiente tabla:

Tipos	Intrusión (mm)	Aceleración de impacto (G)	Fuerza de pico (kN)	Fuerza media (kN)	% Eficiencia de aplastamiento	Peso (KG)
Patrón 2-4-6	117,7	36,76	7,35	2,51	34,15	0,0389832
Patrón 5-6-8	71,96	51,1	10,22	3,22	31,55	0,0594413
Patrón 6-7-9	57,86	63,3	12,66	4,03	31,85	0,068478
Patrón 6-8-10	57,79	63,02	12,6	3,88	30,76	0,0751312
Patrón 7-8-10	48,28	78,56	15,71	4,08	25,95	0,077515
Grosor 3 capas	101,2	27,66	5,53	2,43	43,94	0,0271111
Grosor 4 capas	102,5	36,68	7,338	2,30	31,40	0,036148
Grosor 6 capas	63,51	63,58	12,72	3,18	25,02	0,054222
Grosor 7 capas	48,28	83,07	16,61	4,41	26,55	0,0635463
Grosor 8 capas	42,04	88,2	17,76	5,08	28,60	0,072296
Grosor 10 capas	27,05	130,8	26,16	6,31	24,10	0,0903701
Refuerzo superior	50,3	71,94	14,39	4,29	29,81	0,0701931
Seccion tapa recta 2-4-6	119,6	80,85	16,17	2,50	15,46	0,0386587
Sin tapa	71,78	61,39	12,28	3,89	31,68	0,064384
Acero 0.15 mm	80,53	25,48	5,09	3,096	60,825	0,146469
Acero 0.2 mm	56,5	38,72	7,74	4,49	58,010	0,195292
Acero 0.25 mm	39,95	54,74	10,96	6,51	59,398	0,244115
Acero 0.3 mm	28,62	75,13	15,03	9,12	60,679	0,292937

Con una visión global, actualmente el sector del automóvil supone un 12% del total de las emisiones en Europa, y los materiales compuestos pueden jugar un papel relevante en el sector automovilístico gracias a que permiten obtener productos con un reducido peso y unas altas propiedades mecánicas y rigidez.

En el caso del proyecto, se ha visto la variabilidad de la eficiencia de los Defos según su composición en materiales compuestos, llegando a configuraciones de hasta un 44%, aunque no se ha superado la eficiencia del acero para unos valores muy similares de intrusión del sistema, que rondaban el 60%.

De momento la aplicación para este tipo de estructuras con materiales compuestos en automoción aún está en desarrollo, y tienen un alto coste, por lo que queda reducido actualmente a coches de alta gama; pero actualmente, en el desarrollo de algunos turismos ya está incorporando hasta 4 Defos solamente en la parte delantera del coche, más los dos de la parte trasera, y el factor del reducido peso de los modelos que se han obtenido con fibra (de alrededor de una cuarta parte para unos valores similares de intrusión del de acero) puede ser clave en una reducción de las emisiones del automóvil.

10. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el proyecto se debe hacer una valoración final de los objetivos propuestos y los objetivos alcanzados. A grandes rasgos, los objetivos iniciales se han podido realizar con éxito.

Se ha estudiado el elemento del Defo y sus disciplinas de aplicación, y se ha podido obtener un modelo funcional con material compuesto, del cual se pudieron construir y ensayar probetas para introducir en la simulación. Con estos modelos se han podido lanzar cálculos con éxito para comparar su comportamiento a cambios tales como su composición de capas al largo del cuerpo o la geometría.

A nivel personal he podido profundizar en el uso de dos programas muy completos como son ANSA y META, sobretodo enfocado en la disciplina de materiales compuestos, la cual está en auge actualmente debido al uso de nuevos componentes en automoción de materiales compuestos, mayoritariamente fibra de carbono.

Durante el proyecto se debe destacar que han surgido muchos problemas para la modelización y caracterización del material en ANSA, lo cual con tiempo y dedicación, y con la ayuda de un buen ambiente de trabajo, se han podido solucionar.

De caras a poder inspirar futuros trabajos inspirados en este, se podrían incorporar mejoras en el trabajo como las siguientes:

- Mejorar la eficiencia de los Defos con cambios de geometría.
- Añadir buñas al largo del cuerpo del Defo.
- Incorporar diferentes laminados con diferentes comportamientos en la simulación.
- Ensayar a distintos casos de carga, tales como uno lateral.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Chalmers Crashbox - Crash behavior of composite structures (2014)
- [2] Ahmed Elmarakbi - Advanced Composite Materials for Automotive Applications Structural Integrity and Crashworthiness-Wiley (2013)
- [3] M. Cavazzuti, Optimization Methods: From Theory to Design Scientific and Technological Aspects in Mechanics, Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] C. Qi, S. Yang, and F. Dong, Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading, *Thin-Walled Structures*, 59 (2012), pp. 103–119.
- [5] E. Acar, M. Guler, B. Gerceker, M. Cerit, and B. Bayram, Multi-objective crashworthiness optimization of tapered thin-walled tubes with axisymmetric indentations, *Thin-Walled Structures*, 49 (2011), pp. 94–105.
- [6] Dialnet – Falla de los materiales compuestos laminados
- [7] ESI-Group, Virtual Performance Solution 2014: Solver Reference Manual, vol. 4, 2014.
- [8] Christophe Floreani - Design and Manufacturing of Carbon-Fibre Composite Nose Cone Assembly and Impact Attenuator for Formula Students Competition, Edinburg 2017
- [9] BARTOLETTI Julia - Caracterización a fatiga de compuestos de fibra de carbono unidireccionales a 0° y 45°, 2013
- [10] Eguíluz R. Estudio y optimización de dispositivos de gestión de impacto ('crash-box') a baja velocidad para el sector de la automoción. Madrid: 2017.`
- [11] P. Jonsen, E. Isaksson, K. Sundin, and M. Oldenburg, Identification of lumped parameter automotive crash models for bumper system development, *International Journal of Crashworthiness*, 14 (2009), pp. 533–541.
- [12] Y. Nakazawa, K. Tamura, M. Yoshida, K. Tagaki, and M. Kano, Development of crash-box for passenger car with high capability for energy absorption, in VIII. International Conference on Computational Plasticity, 2005.
- [13] The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction, 2018