

F. Riera<sup>a</sup>, J. Rodríguez<sup>a</sup>, F. Martínez<sup>a</sup>, J. Martí<sup>a</sup><sup>a</sup> Principia, Velázquez 94, 28006 Madrid

## Simulación de impactos sobre láminas de material compuesto

### RESUMEN

**Historia del artículo:**

Recibido 5 de Mayo 2017  
En la versión revisada 5 de Mayo 2017  
Aceptado 31 de Mayo 2017  
Accesible online 21 de Junio 2017

**Palabras clave:**

Fractura interlaminar  
Impacto

El artículo describe en detalle las dificultades que entraña llevar a cabo simulaciones realistas, y en consecuencia útiles desde el punto de vista predictivo, de problemas de impactos localizados en láminas de materiales compuestos.

En esta ocasión se cuenta con resultados experimentales obtenidos en torre de caída, en los que se deja caer un proyectil de cabeza semiesférica desde distintas alturas sobre una lámina cuadrada de material compuesto con los contornos fijos.

Las exhaustivas simulaciones realizadas abarcaron distintos tipos de modelos constitutivos para el material, diversos modelos de daño, varios tipos de elementos y también diferentes estrategias de idealización geométrica (tridimensional y axisimétrica).

Los resultados muestran que, a medida que progresa el daño, el problema se va haciendo sumamente complejo, pues requiere capturar bien el comienzo de los fallos interlaminares, así como reproducir con precisión el paso de un esquema resistente de tipo de flexión a otro de membrana, que es lo que va ocurriendo a medida que esos fallos se desarrollan. Los mejores resultados se obtuvieron empleando un gran número de elementos, con cuatro elementos en cada capa y disponiendo elementos cohesivos entre ellas.

Además de las dificultades planteadas por la simulación numérica, conviene apuntar que en el estudio de estos problemas la caracterización de las propiedades y parámetros que gobiernan el comportamiento del material no suele ser tan precisa y fiable como sería de desear.

## Simulation of impacts on plates made of composite material

### ABSTRACT

**Keywords:**

Interlaminar damage  
Impact

The paper describes in some detail the difficulties encountered when conducting simulations intended to be realistic, and hence useful from a predictive viewpoint, of localised impact events on composite shells.

Experimental results of drop tower tests were available on this occasion, consisting of an impactor with semi-spherical end being dropped from various heights onto a square shell made of composite material.

The exhaustive simulations performed included different constitutive behaviours of the material, damage models, element types, and simulation strategies (three-dimensional and axially symmetric).

The results show that, as the damage level increases, the problem becomes very complex because it requires capturing well the onset of interlaminar failures, as well as reproducing accurately the transition from a bending to a membrane resisting mechanism, which is what happens as those failures accumulate. The best results were obtained using very refined meshes, with four levels of elements per layer, and with cohesive elements between adjacent layers.

Apart from the difficulties posed by the numerical simulation, it is worth pointing out that the study of these problems also tends to suffer because the characterisation of the parameters and properties governing the material behaviour is often less precise and reliable than desirable.

## 1 Introducción

El objetivo final perseguido consiste en simular de una manera fiable los efectos de diversos tipos de impactos sobre láminas de material compuesto y, más concretamente, impactos de pájaro sobre estructuras aeronáuticas. Los trabajos descritos en el presente artículo se enmarcan en este intento de mejorar la fiabilidad de las simulaciones realizadas para estudiar este tipo de problemas.

Los estudios realizados se centran en el análisis de una serie de ensayos llevados a cabo sobre apilados constituidos por 12 capas de tejido de fibras de carbono. El espesor global del apilado es de 4,44 mm y la secuencia de orientaciones a lo largo del espesor viene dada por (45/0/45/0/45/0)S.

Los ensayos consisten en impactos llevados a cabo con distintas energías, que desencadenan diversos niveles de daño en el material. La idea es tratar de simular los efectos producidos, empleando para ello las estrategias y metodologías disponibles, con el fin de contrastar la fiabilidad de los procedimientos empleados. Como podría esperarse, las dificultades que entraña la modelización crecen a medida que aumenta el nivel de daño producido por el impacto.

Más específicamente al trabajo aquí descrito, el análisis mediante elementos finitos de los efectos de ensayos de torre de caída exige modelar adecuadamente las delaminaciones y fallos intralaminares. Estos comportamientos pueden cambiar drásticamente el mecanismo resistente del laminado. Existen metodologías que representan cada capa con elementos láminas tradicionales con elementos cohesivos entre ellas [1], pero la dificultad de capturar adecuadamente la distribución del cortante transversal ha animado a otros autores a usar láminas sólidas (*continuum shells*) [2] o elementos sólidos [3-4]. En el presente trabajo se valoran las distintas metodologías.

## 2 Descripción de los ensayos

Se han comentado ya las características básicas del apilado que se ve sometido a los impactos.

El proyectil consiste en una barra de acero de 15 mm de diámetro cuyo extremo inferior es semiesférico, que se deja caer desde distintas alturas. La masa del proyectil es 16,8 kg y los ensayos se realizaron con tres velocidades de impacto distintas, concretamente 1,5, 2,7 y 4,4 m/s, que corresponden aproximadamente a energías cinéticas de 20, 60 y 160 J, respectivamente.

La Figura 1 muestra los efectos visuales producidos por impactos con los tres niveles de energía mencionados. En la Figura 2 puede verse el daño interno producido por roturas de fibras y delaminaciones; la escala de colores en la figura va desde el azul en las regiones sin daño al blanco en las zonas en que el daño es total.

Las relaciones entre fuerza y desplazamiento producidas en estos tres ensayos aparecen en la Figura 3. Puede verse que el proyectil rebota tras los dos impactos con energías más bajas, mientras que en el de mayor energía se produce una perforación completa.

También es interesante observar que, hasta llegar a la energía cinética del proyectil, la relación fuerza-desplazamiento es similar en los tres casos, confirmando que se trata de procesos de deformación esencialmente estáticos. Como se ve en la figura, si la energía cinética del proyectil se agota antes de perforar, en ese momento se abandona la curva fuerza-desplazamiento común y se produce el rebote; pero mientras el proyectil retenga energía cinética las tres curvas son similares. Esta observación incluye la reducción brusca de 7 kN a 6 kN que la fuerza experimenta para un desplazamiento de 2 mm, probablemente indicativa del comienzo de fallos cohesivos; también incluye la estabilización de la fuerza en 10-11 kN para desplazamientos entre 3,5 mm y 6,5 mm. Más allá de 6,5 mm la fuerza disminuye gradualmente hasta cero, lo que ocurre al consumirse la perforación a los 15 mm.

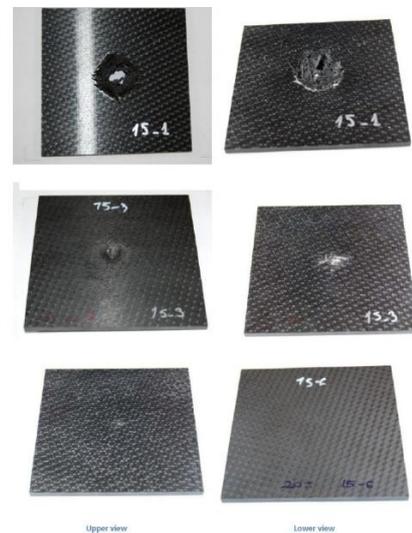


Figura 1. Daño producido por los ensayos

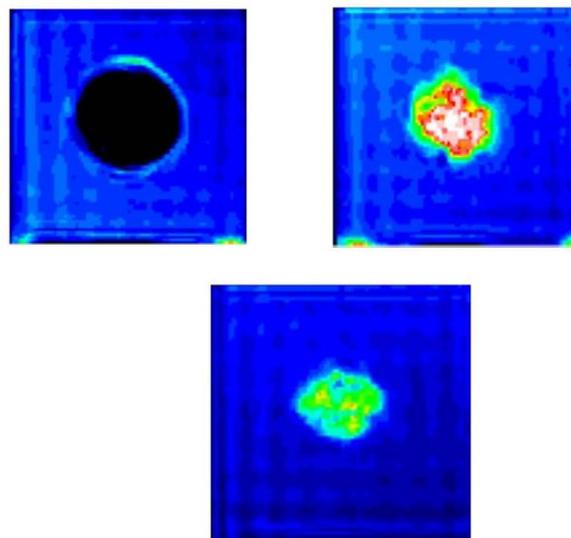
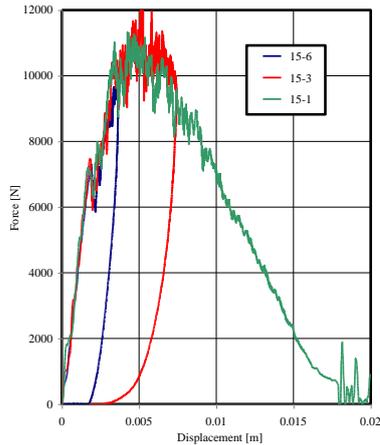


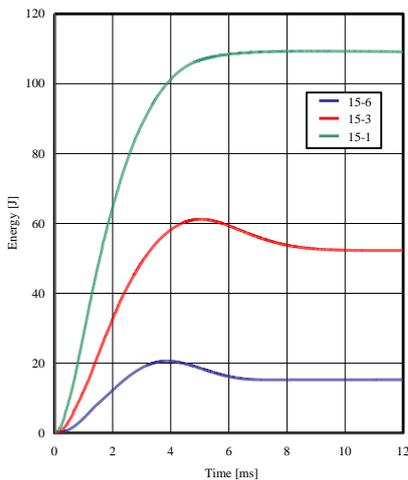
Figura 2. Vista del daño mediante CSCAN





**Figura 3.** Relación fuerza-desplazamiento en los ensayos

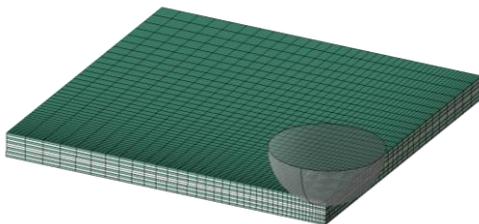
La Figura 4 presenta las energías absorbidas por el blanco a lo largo del tiempo en los tres ensayos. La reducción observable en los dos impactos con menores energías representa la energía almacenada en el blanco cuando ya se ha detenido el proyectil y que se devuelve luego al proyectil para su rebote.



**Figura 4.** Energía absorbida en los impactos

### 3 Métodos tradicionales

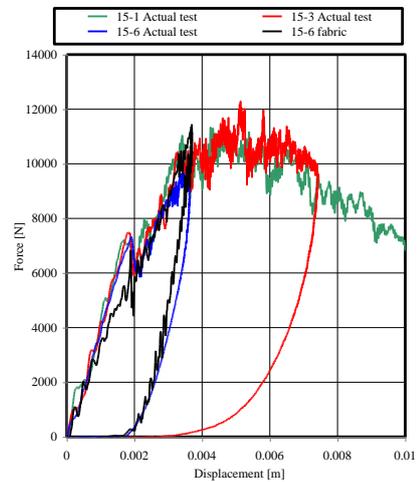
Entendemos aquí por métodos tradicionales los que se basan en modelos en que la representación del apilado se lleva a cabo empleando láminas sólidas (*continuum shells*), una por cada una de las telas involucradas. Con esa metodología la Figura 4 muestra el modelo construido con Abaqus [5], que aprovecha las simetrías existentes en el problema para reducir el mallado.



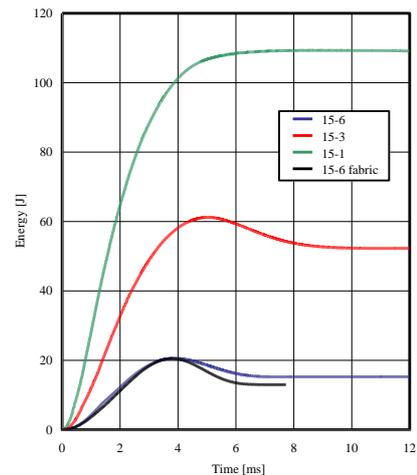
**Figura 4.** Modelo para estudiar el impacto

Tratando de reproducir bien los resultados obtenidos en los ensayos físicos se llevaron a cabo intentos con distintos tipos de formulaciones constitutivas. El primero fue el modelo “*fabric*” de Abaqus/Explicit, que es un modelo fenomenológico diseñado para capturar el comportamiento anisótropo y no lineal de la tela. El daño se basó en una curva analítica de descarga derivada del factor de disipación de energía (la fracción de energía disipada a cada nivel de deformación). En estos análisis, la cohesión interlaminar se representó con elementos cohesivos con los límites de tensión y energías de daño adecuados.

Los resultados obtenidos pueden verse en las Figuras 5 a 7, que muestran respectivamente la curva fuerza-desplazamiento, la energía absorbida en el proceso y el daño sufrido por los elementos cohesivos. Puede verse que el modelo no logra reproducir bien la rigidez inicial y, en consecuencia, lo mismo ocurre con la caída de tensión que ocurre al generalizarse el fallo del material cohesivo con un nivel de fuerza de unos 7 kN.

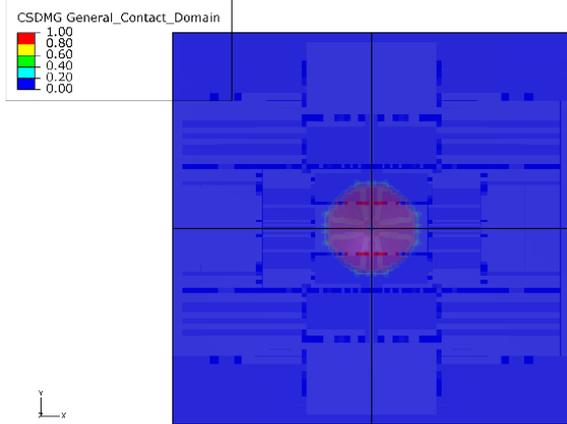


**Figura 5.** Comparación respuesta Fuerza-Desplazamiento



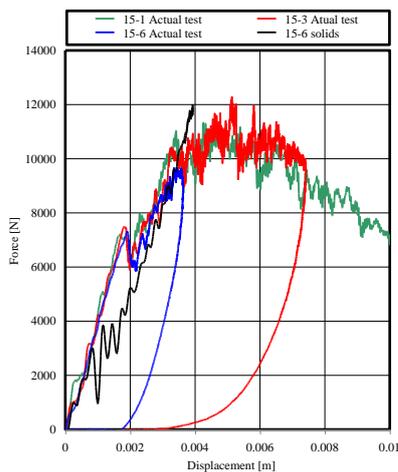
**Figura 6.** Energía absorbida en el impacto



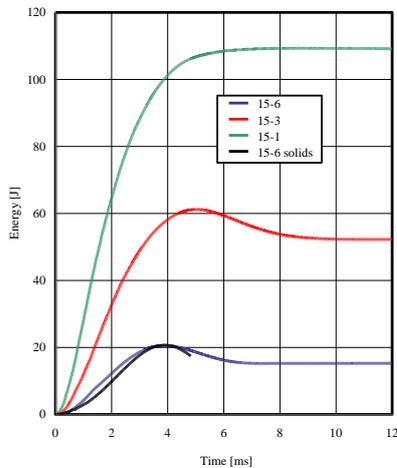


**Figura 7.** Energía absorbida en el impacto

También se hicieron intentos de reproducir los ensayos usando elementos sólidos en lugar de láminas sólidas. Sin entrar en los detalles, los resultados fueron una vez más insatisfactorios, como puede verse en las Figuras 8 y 9, que presentan respectivamente la relación fuerza-desplazamiento y la absorción de energía.



**Figura 8.** Respuesta Fuerza-Desplazamiento. Elementos sólidos

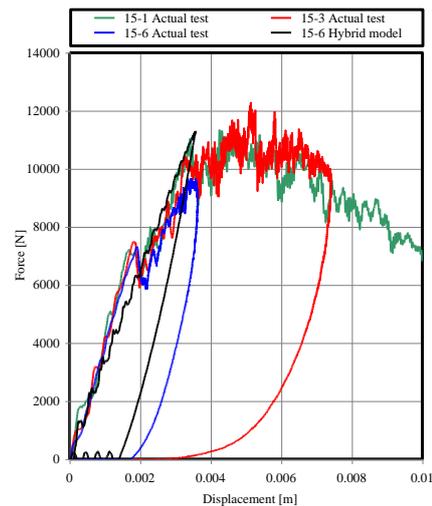


**Figura 9.** Energía absorbida en el impacto. Elementos sólidos

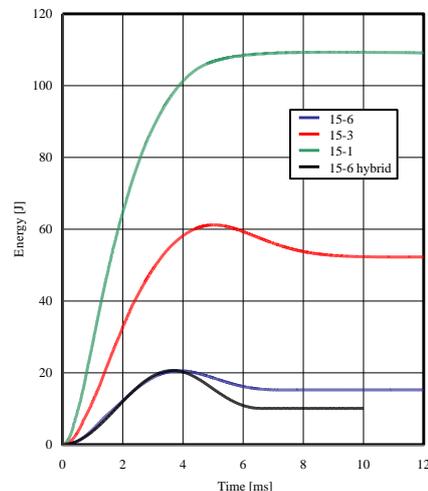
Tampoco fueron satisfactorios los resultados obtenidos con un modelo híbrido, en el que se superpusieron en la misma región espacial, láminas sólidas con un modelo de Hashin y

elementos sólidos con comportamiento elastoplástico; las primeras trataban de capturar el comportamiento de la tela mientras los segundos representaban el de la matriz. La Figura 10 muestra la evolución de la fuerza al crecer los desplazamientos, la Figura 11 indica la energía absorbida y, finalmente, el daño sufrido por el material cohesivo aparece en la Figura 12. Como puede verse, el modelo no captura la pérdida brusca de carga hacia los 7 kN y la disipación de energía es insuficiente, lo que acaba suministrando una energía excesiva al rebote del proyectil.

El modelo de Hashin mencionado supone que el daño se caracteriza por una degradación progresiva de la rigidez del material que acaba por llevar a su fallo. El modelo requiere un comportamiento elástico lineal del material no dañado e incorpora cuatro modos de fallo distintos: tracción de las fibras, compresión de las fibras, tracción de la matriz y compresión de la matriz. Debe usarse en combinación con el criterio de iniciación de daño de Hashin y está basado en la disipación de energía que ocurre durante el proceso de daño. La cohesión interlaminar se representó con elementos cohesivos entre telas adyacentes. Los resultados aparecen en las Figuras 13 y 14 y, una vez más, no se considera que describan la secuencia de acontecimientos con la precisión deseable.



**Figura 10.** Respuesta Fuerza-Desplazamiento. Modelo híbrido



**Figura 11.** Energía absorbida en el impacto. Modelo híbrido



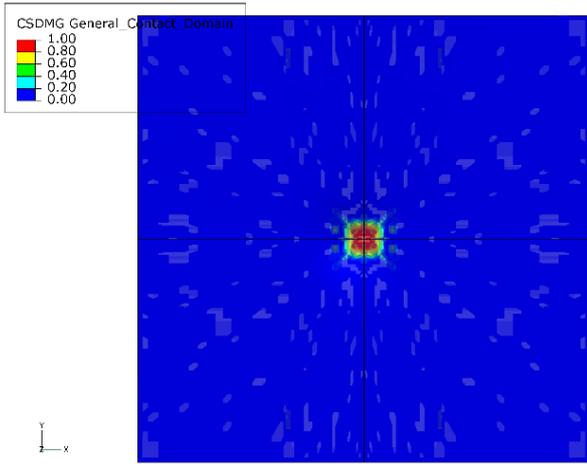


Figura 12. Energía absorbida en el impacto. Modelo híbrido

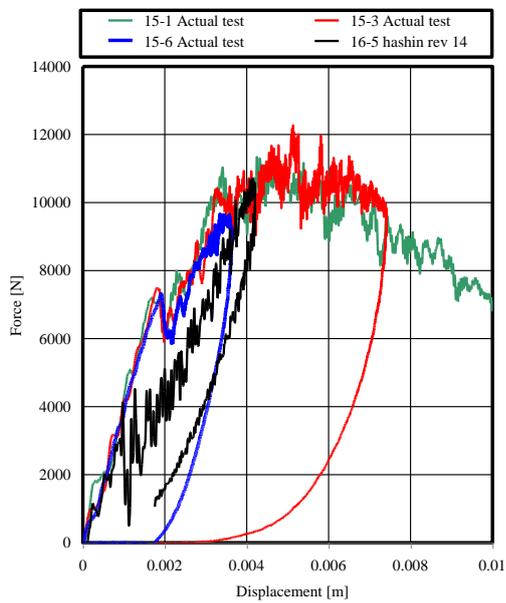


Figura 13. Respuesta Fuerza-Desplazamiento. Modelo con Hashin

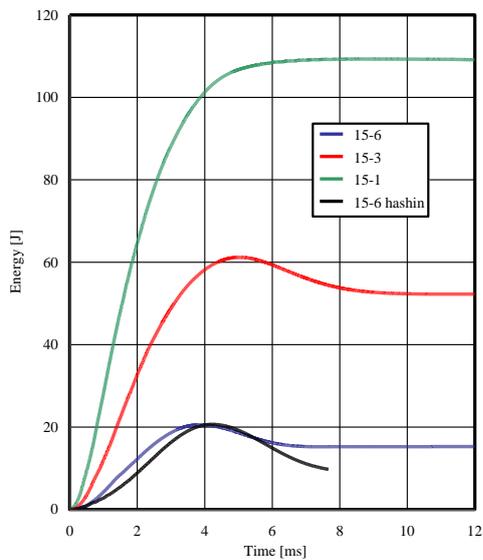


Figura 14. Energía absorbida en el impacto. Modelo con Hashin

También se utilizó este mismo modelo prescindiendo de los contactos cohesivos, simplemente solidarizando los nodos contiguos de telas adyacentes. El objetivo era comprobar si ello mejoraría la predicción de la rigidez inicial. Como se ve en la Figura 15, que presenta la relación fuerza-desplazamiento, el cálculo tuvo éxito en ese sentido; sin embargo, la figura también muestra que los aspectos de disipación de energía no quedan adecuadamente representados, como confirma la Figura 16.

Finalmente, un nuevo intento de simular la respuesta del material con láminas sólidas provistas con el comportamiento “VUMAT” tampoco tuvo éxito, como puede verse en la Figura 17. Aunque la caída de la fuerza asociada al fallo de las conexiones cohesivas es aproximadamente correcta, la rigidez inicial movilizada es claramente demasiado baja.

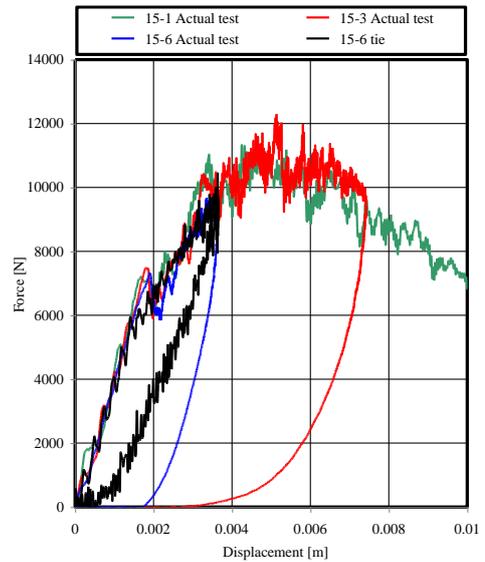


Figura 15. Respuesta fuerza-despl. Modelo con Hashin y “tie”

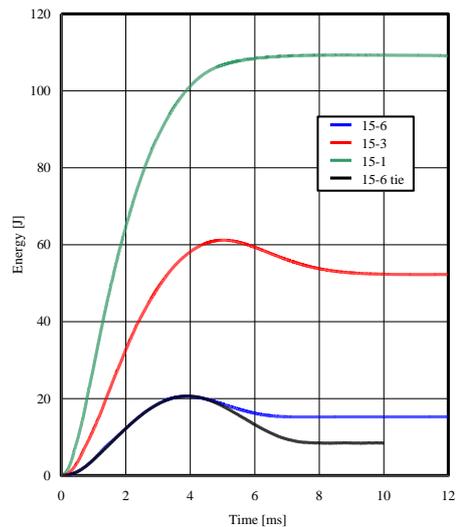


Figura 16. Energía absorbida en el impacto. Modelo con Hashin y “tie”



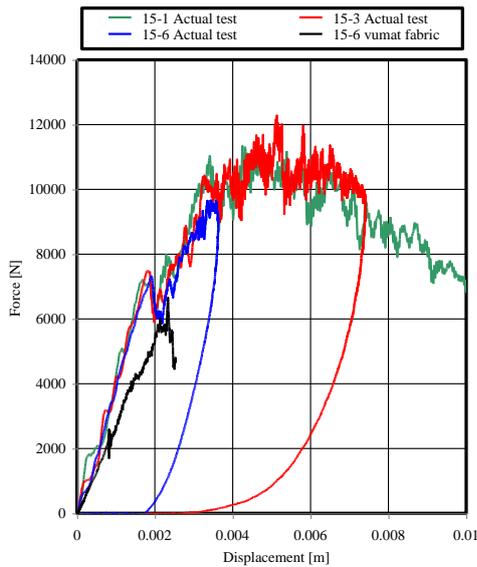


Figura 17. Respuesta Fuerza-Desplazamiento. Modelo con "VUMAT"

#### 4 Modelo de detalle

Dadas las dificultades experimentadas al tratar de reproducir los ensayos de impacto con las metodologías tradicionales, se realizaron algunas investigaciones adicionales. En éstas, a fin de mejorar la representación de lo que ocurre en las telas individuales, se utilizaron cuatro capas de elementos sólidos para modelar cada tela, con elementos cohesivos interpuestos entre telas adyacentes. Las telas se describieron con sus propiedades elásticas correspondientes y se utilizó un modelo de daño para caracterizar su deterioro. Se descartó activar la supresión de elementos para evitar el ruido numérico que ese proceso conlleva.

Es claro que los mallados tan refinados como el descrito no son prácticos para estudiar problemas reales. Sin embargo, a efectos de la presente investigación y en el contexto de los problemas de impacto considerados, este tipo de mallado podía emplearse con una representación axisimétrica del problema. La malla adoptada es la que aparece en la Figura 18; su extensión radial es 48 mm, seleccionada para que la rigidez inicial movilizada por el proyectil al actuar en el centro del círculo coincida con la que resulta en un cuadrado con lados de 80 mm. La Figura 19 muestra un detalle de la malla que permite observar el grado de refinamiento.



Figura 18. Modelo axisimétrico

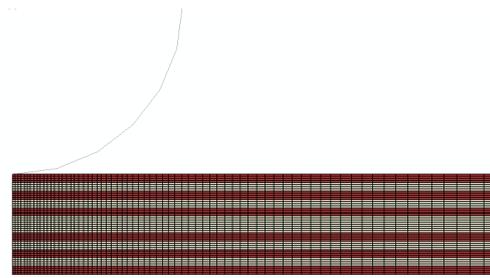


Figura 19. Modelo axisimétrico. Detalle de la malla

Los parámetros empleados en el modelo son coherentes con la información disponible sobre los materiales, es decir que no se hizo ningún intento de ajustar los parámetros para lograr una mejor reproducción de los resultados de los ensayos.

La tensión última en la dirección de las fibras se tomó como 790 MPa y para la energía de fractura se usó 5 kJ/m<sup>2</sup>. Las propiedades elásticas se resumen en la Tabla 1. Puesto que Abaqus no ofrecía la posibilidad de introducir daño en este tipo de elementos, se escribió una rutina específicamente para este fin.

En base a la información producida por ensayos en modo I y modo II, la resina se caracterizó con unas tensiones pico (normal 130 MPa y cortante 200 MPa) y unas energías de fractura (normal 0.8 kJ/m<sup>2</sup> y cortante 1.6 kJ/m<sup>2</sup>). Finalmente, tras el fallo de las conexiones cohesivas, se supuso que el contacto entre telas contiguas movilizaba un coeficiente de fricción de 0.3.

Tabla 1. Propiedades elásticas

Denominación	0°	45°
E <sub>r</sub> (GPa)	57,0	17,7
E <sub>z</sub> (GPa)	8,5	8,5
E <sub>θ</sub> (GPa)	57,0	17,7
ν <sub>rz</sub>	0,30	0,09
ν <sub>rθ</sub>	0,03	0,70
ν <sub>zθ</sub>	0,04	0,04
G <sub>rz</sub> (GPa)	4,2	4,2
G <sub>rθ</sub> (GPa)	5,2	5,2
G <sub>zθ</sub> (GPa)	4,2	4,2

La evolución de las tensiones para niveles crecientes del desplazamiento se muestra en las Figuras 20 y 21, la primera para las tensiones radiales y la segunda para las circunferenciales. La Figura 22 presenta la variable de daño para los niveles de desplazamiento de las figuras anteriores. Como puede observarse, la delaminación se generaliza cuando el desplazamiento del proyectil alcanza unos 2 mm. Las bandas rojas verticales corresponden a fracturas radiales de las fibras, mientras que las circunferenciales predominan en el resto del espécimen.



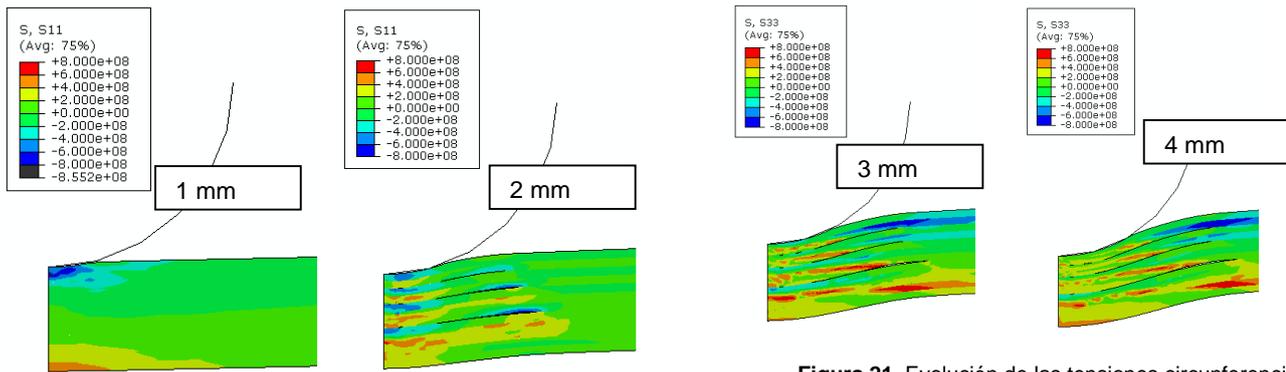


Figura 21. Evolución de las tensiones circunferenciales

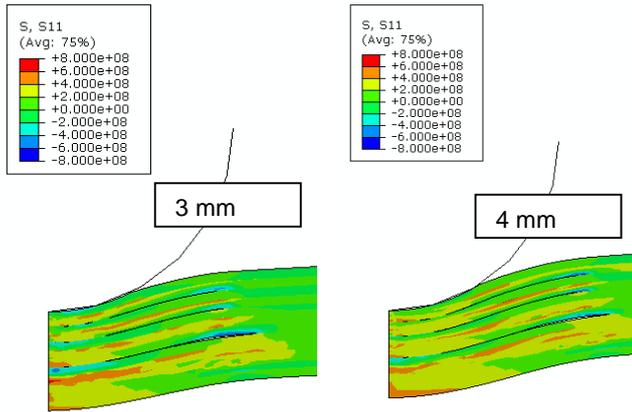


Figura 20. Evolución de las tensiones radiales

La relación fuerza-desplazamiento generada se plasma en la Figura 23 junto con las obtenidas en los ensayos físicos. La Figura 24 presenta la misma información, ahora filtrada con un filtro Butterworth de paso bajo a 60 Hz para clarificar el resultado.

En primer lugar, es claro que el modelo reproduce muy bien la rigidez inicial de la respuesta, lo que sugiere que la combinación de dimensiones, módulos y modos de deformación es correcta, pues no parece probable que de haber errores éstos se compensaran fortuitamente.

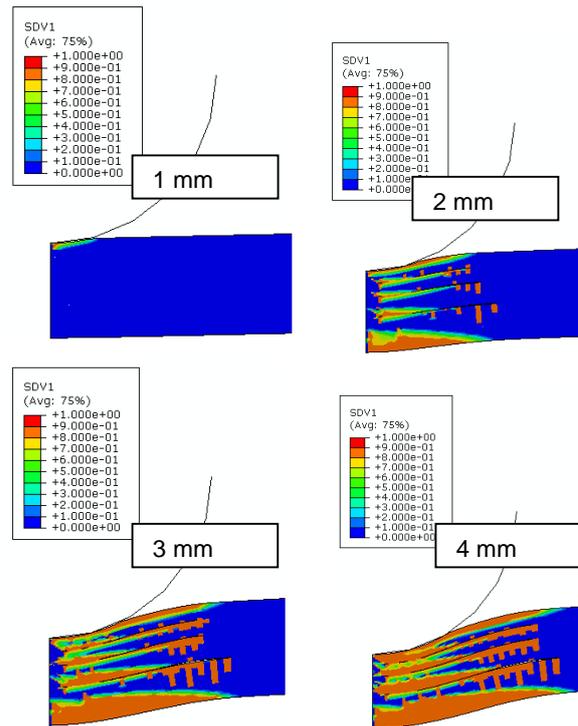
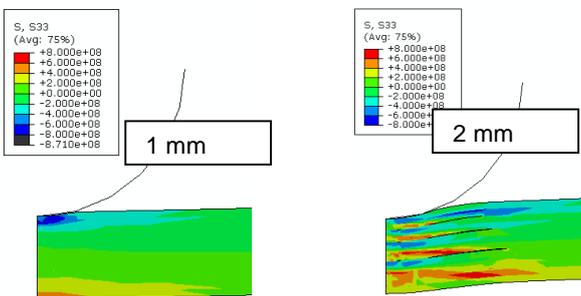


Figura 22. Evolución de la variable de daño

Por otra parte, la reducción de la fuerza que se observa en los tres ensayos cuando el desplazamiento se acerca a 2 mm, momento en que la fuerza se reduce de algo más de 7 kN a unos 6 kN, también está bien capturada en los análisis. Esta reducción corresponde a los fallos producidos en las uniones cohesivas entre telas contiguas; en este momento los fallos de estas uniones se generalizan hasta abarcar del orden de la mitad de la distancia al contorno, es decir, unos 25 mm.

Tras los fallos del material cohesivo las 8 telas esencialmente empiezan a comportarse como membranas, puesto que la capacidad de transmitir cortantes se ha visto severamente limitada. La pérdida brusca de rigidez es el resultado observable de la transición a un mecanismo resistente de membrana. Esta nueva rigidez es también capturada de forma satisfactoria en el cálculo.



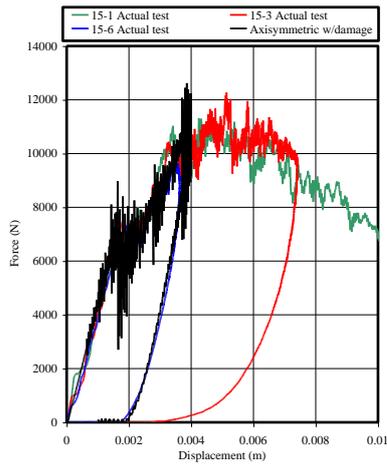


Figura 23. Respuesta Fuerza-Desplazamiento. Modelo axisimétrico

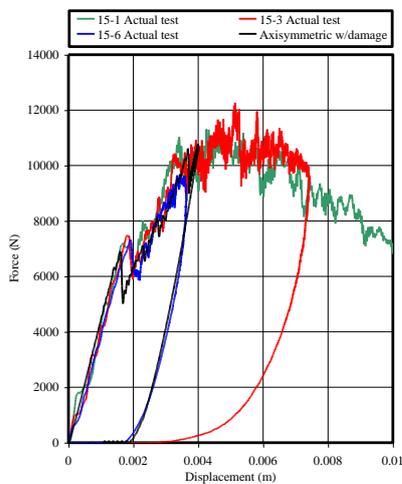


Figura 24. Respuesta fuerza-despl. filtrada. Modelo axisimétrico

Si el material no experimentara daño, la rigidez asociada con el comportamiento de membrana crecería con los desplazamientos. La pérdida de rigidez que evidencian los ensayos está causada por los fallos intralaminares, que ahora comienzan a tener lugar, empezando por las fibras más cargadas. El modelo numérico, una vez más, produce resultados razonablemente buenos en la simulación de estos eventos.

Como puede verse no se llevó a cabo ningún intento de proseguir la simulación una vez que se entra en la meseta de fuerzas hacia 10-11 kN. Uno de los motivos es que, como ya se indicó, no se había introducido la supresión de elementos excesivamente distorsionados. Pero una segunda razón es que esta meseta está claramente relacionada con la rotura gradual de fibras, que es función de las elongaciones inducidas, elongaciones que no coincidirían en la pieza cuadrada ensayada y en el modelo axisimétrico analizado.

Debe por tanto concluirse que las técnicas disponibles permiten en principio capturar todos los mecanismos de interés en la respuesta. Sin embargo, hay también claras limitaciones, pues el nivel de refinamiento que fue necesario emplear en el mallado no es realmente contemplable a la hora de analizar problemas tridimensionales reales de interés práctico.

## 5 Resumen y conclusiones

Se han empleado diversas técnicas de simulación para intentar reproducir los efectos de impactos de proyectiles a baja velocidad sobre láminas de material compuesto.

Los procedimientos convencionales no dieron buenos resultados. Algunos aspectos importantes, tales como el inicio de los fallos interlaminares, no se capturan bien con las formulaciones basadas en láminas sólidas (*continuum shells*), cuyo tratamiento de los cortantes transversales es inherentemente poco adecuado. Los intentos de mejorar esa situación usando mallados sólidos e híbridos no dieron los resultados apetecidos.

A fin de clarificar los mecanismos y sus implicaciones sobre la estrategia de simulación se llevaron a cabo análisis adicionales, empleando elementos sólidos para las telas y elementos cohesivos para unirlos. Los resultados obtenidos indican que este tipo de procedimientos sí resultan adecuados para reproducir los procesos desencadenados y reproducir los ensayos, pero los mallados necesarios son tan refinados que no resultan prácticos a la hora de analizar problemas de contorno de interés industrial.

Conviene destacar que, aparte de las limitaciones impuestas por las herramientas y técnicas numéricas, hay también incertidumbres considerables en relación con los valores de los parámetros que caracterizan muchas propiedades importantes. Un ejemplo son las energías de daño con diversas direcciones de carga, en apilados de muchas telas con enlaces cohesivos entre ellas.

En suma, en este tipo de impactos, las primeras fases de la respuesta pueden simularse con fiabilidad, pero esta fiabilidad va decreciendo a medida que aumenta el nivel de daño. Por ello, las técnicas existentes pueden ser perfectamente adecuadas para analizar diseños más conservadores, que experimentan daños reducidos en el curso de los impactos postulados.

## Referencias

- [1] A. Qui, K. Fu, W. Lin, C. Zhao, Y. Tang "Modelling Low-Speed Drop-Weight Impact on Composite Laminates", *Materials and Design* **60**, pág. 520-531 (2014).
- [2] S. Long, X. Yao, X. Zhang "Delamination Prediction in Composite Laminates under Low-Velocity Impact", *Composite Structures* **132**, pág. 290-298 (2015).
- [3] M. A. Hassan, S. Naderi, A. R. Bushroa "Low-Velocity Impact Damage of Woven Fabric Composites: Finite Element Simulation and Experimental Verification", *Materials and Design* **53**, pág. 706-718 (2014).
- [4] D. Feng, F. Aymerich "Finite Element Modelling of Damage Induced by Low-Velocity Impact on Composite Laminates", *Composite Structures* **108**, pág. 161-171 (2014).
- [5] SIMULIA "Abaqus Documentation User's Guide", versión 2017.

