

## Estudio del comportamiento de módulos de autobuses fabricados en materiales compuestos ante ensayo de vuelco

R.Grimaldi, E.Alcalá, A.L. Martín, F. Aparicio

*Instituto Universitario de Investigación del Automovil (INSIA). Universidad Politecnica de Madrid.*  
r.grimaldi@upm.es

---

### Resumen

*La creciente preocupación por la seguridad en el transporte de pasajeros, ha hecho que las estructuras de los autobuses y autocares se vean sometidas a solicitaciones cada vez más exigentes, sobre todo ante condiciones de vuelco cuyos requerimientos vienen determinados por el Reglamento 66 de Ginebra. Es por eso que en esta ponencia se pretende presentar una alternativa de estructura con materiales compuestos para el uso de los mismos como método reductor de masa de los vehículos. Para ello se presentan ensayos a flexión de pilares, anillos, módulo y modelos de cálculos validados con dichos ensayos.*

---

### INTRODUCCIÓN

El aumento de los requerimientos estructurales que se le exige a las estructuras de autobuses y autocares, implica que estos evolucionen hacia el uso de nuevas tecnologías para su fabricación. Uno de los mayores avances exigidos a las actuales estructuras es la reciente obligatoriedad del uso de cinturones de seguridad para todos los vehículos de transporte de pasajeros. El uso de los cinturones de seguridad, implica que parte de la masa de los pasajeros quede solidaria al vehículo ante, por ejemplo, el vuelco del mismo.

El comportamiento de la estructura ante dicho accidente, viene determinado según el Reglamento 66 en sus revisiones 0 y 1. En dicha norma se especifica, entre otros factores, la energía mínima que la estructura del vehículo debe ser capaz de absorber bajo condiciones de vuelco. Esta energía es directamente proporcional a las dimensiones principales del vehículo y a su masa en vacío en orden de marcha, que en el caso de uso de cinturones de seguridad por parte de los pasajeros, se ve aumentada por parte de la masa de los propios pasajeros. Este aumento de masa se traduce en un aumento en la energía requerida entre un 25-30% con respecto al mismo vehículo sin el uso de cinturones de seguridad. Este aumento de energía, unido al hecho cada vez más imperioso que los vehículos pesen menos para así disminuir los consumos, ha hecho que se estudien nuevas tecnologías aplicadas a las estructuras para absorber dicho aumento de energía sin penalizar la masa del vehículo.

Hasta el momento, los avances realizados en España en las estructuras de los autobuses y autocares actuales han consistido principalmente en cambios de espesores o cambios de calidades de los aceros o una combinación de ambos. Esto se cambio se producen principalmente en la perfilería encargada de absorber la energía requerida en caso de vuelco, como son los anillos que conforman la estructura, la zona delantera y la trasera, aunque en general se puede englobar toda perfil que trabaje a flexión, y por tanto absorba energía, en caso de vuelco.

Para evitar este aumento de masa y por tanto de energía requerida, se propone el uso de nuevos materiales en las estructuras de los vehículos, como son los materiales compuestos. Un material compuesto es aquel formado por dos o más tipos de materiales, formando un nuevo material con mejores características mecánicas que los anteriores por separado. En el caso del uso de estos materiales ante solicitaciones estructurales, lo más común es el uso de fibra de vidrio o fibra de carbono unida a una resina epoxi.

En este caso se estudiará el comportamiento de pilares, anillo y módulo de materiales compuestos y se verificará su viabilidad ante condiciones de vuelco. Por otro parte también se ha realizado un modelo paramétrico para el material compuesto con el fin de cuantificar las diferencias de volumen de fibra debido al proceso de

fabricación.

Todos los ensayos se engloban dentro del proyecto LITEBUS perteneciente el VI Programa Marco de la UE. Todas las muestras de ensayo de pilares y anillos se fabricaron entre TUC-Clausthal e INEGI siendo todos los ensayos realizados en el INSIA-UPM. Para la fabricación del modulo intervino INEGI, TUC Clausthal, PUK, MAURI, NTET y CAETANO BUS

## ENSAYO DE FLEXIÓN DE PERFILES DE MATERIALES COMPUESTOS

Para comenzar con el estudio de la viabilidad de estos materiales en las estructuras de los autobuses, se realizan ensayos solo de pilares y de anillos de materiales compuestos para predecir con posterioridad el comportamiento de un modulo completo.

### Ensayo de pilares

En este caso se ensaya dos tipos de pilares, ambos fabricados manualmente mediante el uso de molde y contramolde impregnando la resina epoxi mediante inyección. Se muestra en la Fig. 1 la sección de los pilares rellenos de espuma en su interior, y fabricados por INEGI y por TUC-Clausthal. A pesar de que los materiales y las capas son similares en ambas secciones, y de que el proceso de fabricación en ambos casos es similar, se puede apreciar como la geometría de la sección en ambos casos varía.



Fig. 1. Sección de pilares

El tipo de ensayo realizado corresponde a la simulación de las solicitaciones producidas en los perfiles de la estructura en caso de vuelco. De esta manera para un mismo anillo, ante condiciones de vuelco, hay un lateral en el que el pilar se ‘abre’ y otro contrario en el que se ‘cierra’, por lo que se realizan dos ensayos a flexión para cada pilar.

Como procedimiento de ensayo, se ancla la probeta por uno de sus extremos a un banco de ensayos y se aplica una fuerza en el otro extremo mediante un cilindro hidráulico, de manera que se asegure el funcionamiento del pilar a flexión. En la Fig. 2 se muestra la disposición tomada para el ensayo, así como los sensores utilizados para los que se va a obtener la curva fuerza – desplazamiento.

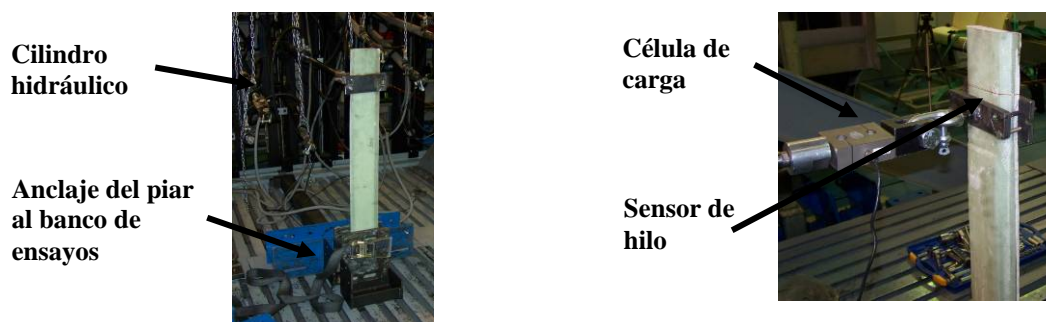


Fig. 2. Configuración de ensayo a flexión de los pilares

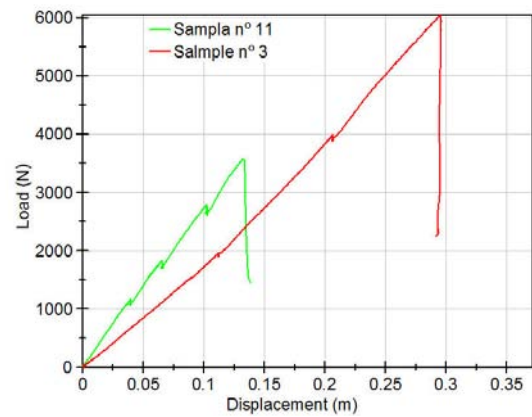


Fig. 3. Resultado de ensayo abriendo

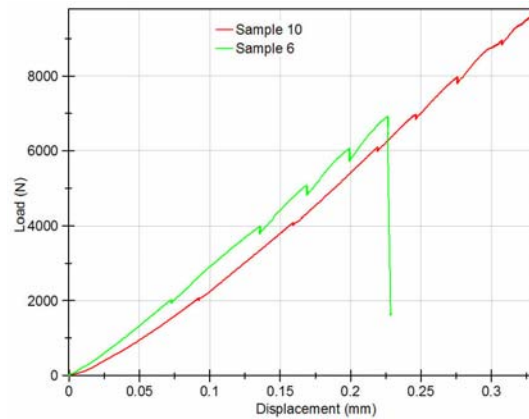


Fig. 4. Resultado de ensayo cerrando

En ambos casos el fallo se produce por rotura de fibra y matriz en la zona de sujeción de la muestra de ensayo debido, principalmente al sistema de anclaje de la probeta.

### Ensayo cuasi-estático de anillo completo

Con objeto de aumentar la rigidez del material se optó por utilizar fibra de carbono en lugar de fibra de vidrio como se utilizaron en los ensayos anteriores. Al igual que en los ensayos anteriores se utiliza una célula de carga y un hilo para obtener la curva fuerza-desplazamiento del ensayo (Fig. 5).

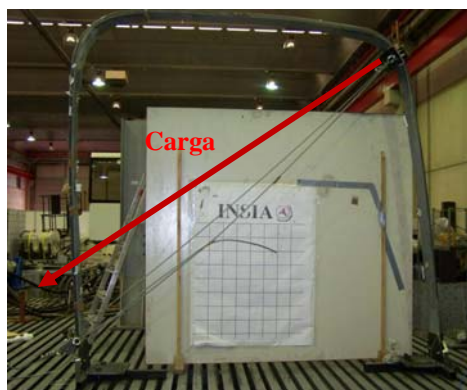


Fig. 5. Ensayo de anillo completo en FC

En la Fig. 6 se puede ver como la deformación máxima hace que exista delaminación en la zona de techo del anillo. Esta deformación es casi inexistente al acabar el ensayo, ya que el comportamiento del material

compuesto es principalmente elástico, quedando el acero como responsable de la existencia de cualquier comportamiento plástico.



Fig. 6. Deformación a máxima carga

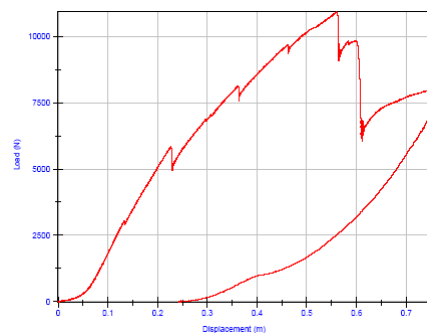


Fig. 7. Deformación sin carga. Curva fuerza – desplazamiento

La energía de deformación hasta el instante en el que se produciría la invasión del espacio de supervivencia es de 4.950 J siendo esta, en su gran mayoría energía elástica.

### Ensayo dinámico del módulo

El módulo está formado por los anillos antes ensayados en fibra de carbono más diferentes elementos de unión; toda la zona correspondiente desde el piso de butacas hasta el piso de bodegas es de acero de calidad S275JR; el piso de butacas está formado por planchas de material prefabricado llamado Sonoflor; los laterales y techo se componen de estructuras tipo sándwich pegadas a los anillos y al perfil pultrudido de piso que por un lado le da integridad al conjunto y por el aporta rigidez a la unión.

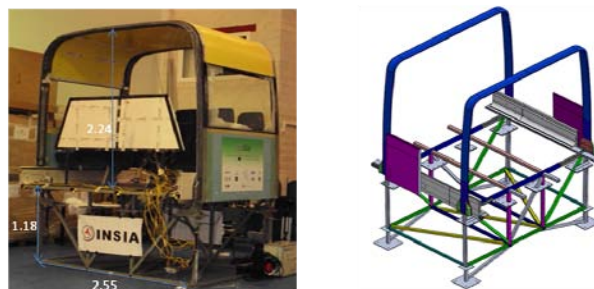


Fig. 8. Características del módulo de ensayo

Como procedimiento de ensayo se ha tenido en cuenta los requerimientos establecidos en el Reglamento 66 de Ginebra en su revisión 1, en el anexo 6: "Ensayo de vuelco utilizando secciones de carrocería como método de homologación equivalente". Para la realización del ensayo es necesario que las características del módulo sean similares a las que tendría en el resto del autobús. Según esto la masa del módulo se obtuvo mediante su pesaje dando un valor de 730 kg, y su centro de gravedad se obtuvo mediante ensayo en la plataforma de estabilidad. Para la realización del ensayo del centro de gravedad se posiciona la estructura sobre la plataforma de ensayo, y se lleva a su instante de equilibrio donde se mide el instante de vuelco mediante un inclinómetro. Conocido el

ángulo de vuelco de la estructura y las dimensiones de la misma se puede calcular su altura de centro de gravedad, dando este un valor de 1,612 m (ver Fig. 10).

Al tener el vehículo sistema de retención de pasajeros se ha tenido en cuenta la masa de los mismos mediante el uso de maniqués rellenos de agua, que simulan la masa de cada pasajero y su altura del centro de gravedad. Según el Reglamento esta masa debes ser de 78 kg por pasajero, con una altura del centro de gravedad de 0.225 m medidos desde el asiento. Por tanto, teniendo en cuenta a los pasajeros, la masa del módulo en el ensayo de vuelco es de 1.042 kg y la altura del centro de gravedad queda en 1,616 m.

Con estos datos es posible calcular la energía que el módulo debe ser capaz de absorber antes de invadir el espacio de supervivencia, siendo; M la masa del módulo en condiciones de carga (con los pasajeros retenidos), g la constante de gravedad y Δh la caída del centro de gravedad calculada mediante dibujo según Fig. 10.

$$E_T = 0,75 \cdot g \cdot M \cdot \Delta h \quad (1)$$



Fig. 9. Maniqué de pasajero

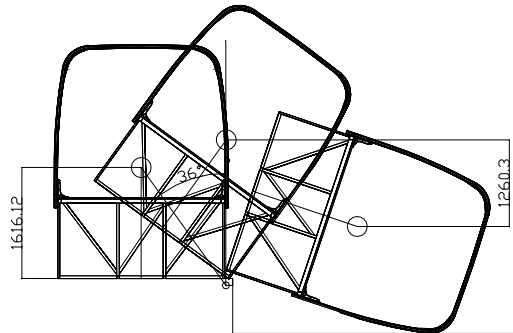


Fig. 10. Caída del centro de gravedad: Δh

Con esto la energía que el módulo debe absorber antes de invadir el espacio de supervivencia es de 12.914 J.

Con objeto de analizar el comportamiento del módulo, se instalaron diferentes sensores en puntos estratégicos de la estructura, como son:

- Cuatro sensores de hilo posicionados en cruz en cada anillo utilizados para medir la deformación final de la estructura (en Fig. 11 señalados con líneas rojas).
- Dos acelerómetros triaxiales colocados en el piso de butaca y en el de bodega (en Fig. 11 señalados con círculos blanco e indicando la dirección de cada uno, siendo el eje Z el vertical al módulo y el eje Y el transversal al mismo)).



Acelerometro triaxial



Sensor de hilo

Fig. 11. Posición de los sensores utilizados

Con una cámara de alta velocidad se obtuvo en comportamiento de la estructura durante el ensayo y al final del mismo.

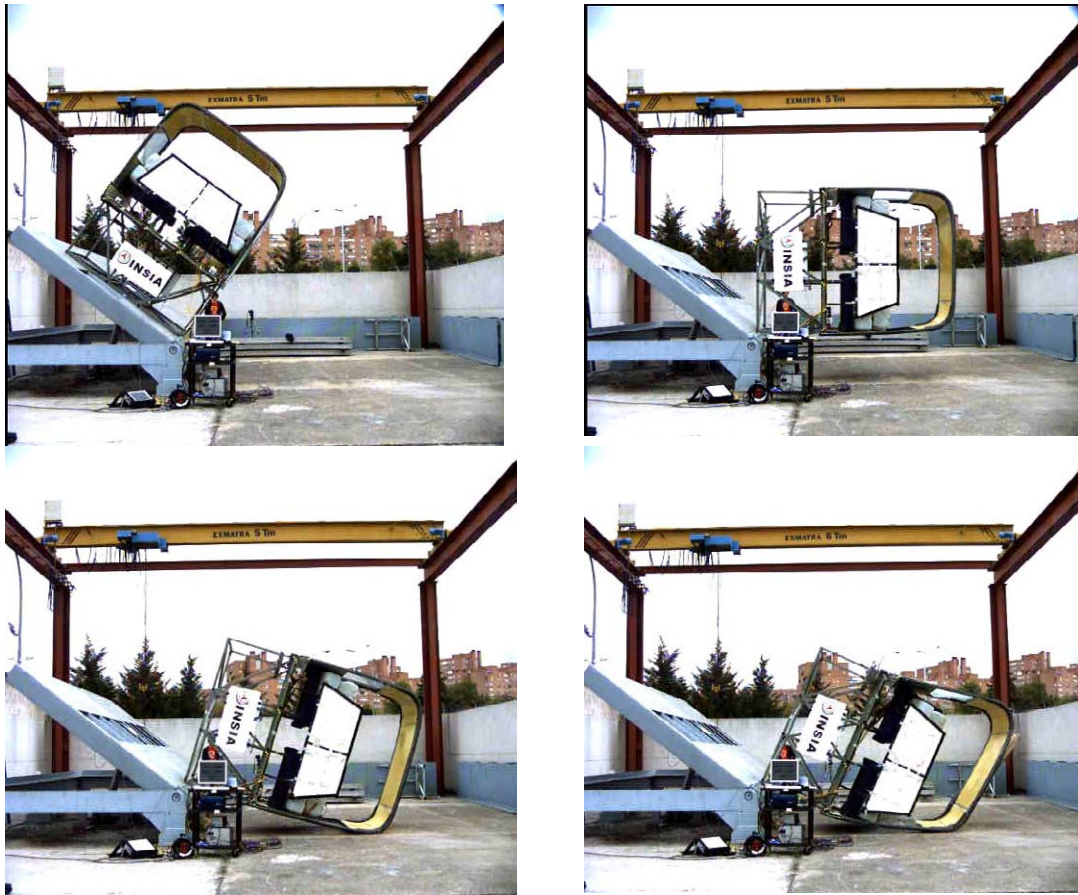


Fig. 12. Ensayo de vuelco de la estructura hasta el punto de máxima deformación.

Se muestra en la Fig. 13 los resultados obtenidos de los acelerómetros instalados en el módulo. Todas las señales han sido tratadas con un filtro paso bajo de 60 Hz.

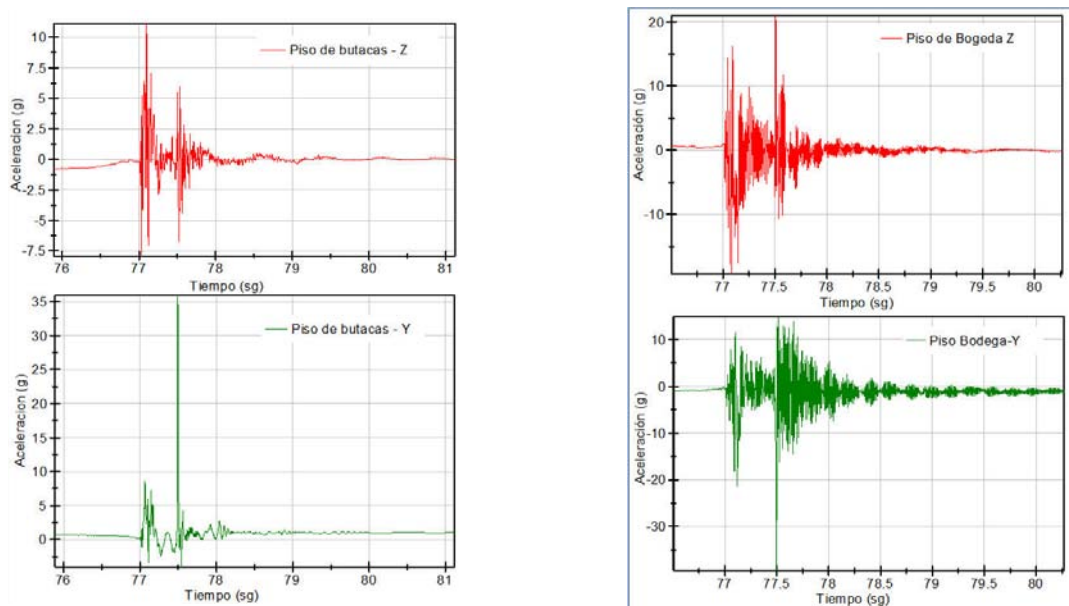


Fig. 13. Resultado de los acelerómetros

En la figura anterior se han mostrado los resultados de los acelerómetros en las direcciones Y y Z siendo la X la longitudinal al módulo y en este caso carente de interés científico. En todos los casos se pueden apreciar dos zonas de picos máximos correspondiente, la primera al primer instante en el que el módulo impacta con el suelo y la segunda al rebote del mismo. De esta manera, se puede obtener que la aceleración de caída del módulo en un ensayo de vuelco es de entre 8 y 12 g's

En la Fig. 14 se muestra los resultados obtenidos de los cuatro sensores de hilo instalados. En todos los casos se comprueba que la diferencia entre el desplazamiento inicial y final que sufren cada uno de ellos es menor que 0.05 m, lo que nos indica que la deformación final de la estructura es casi inapreciable. El pico de desplazamiento que se muestra en todos los sensores corresponde al momento de deformación máxima (Fig. 12) que sufre la estructura (unos 0.25 m), que después recupera casi en su totalidad.

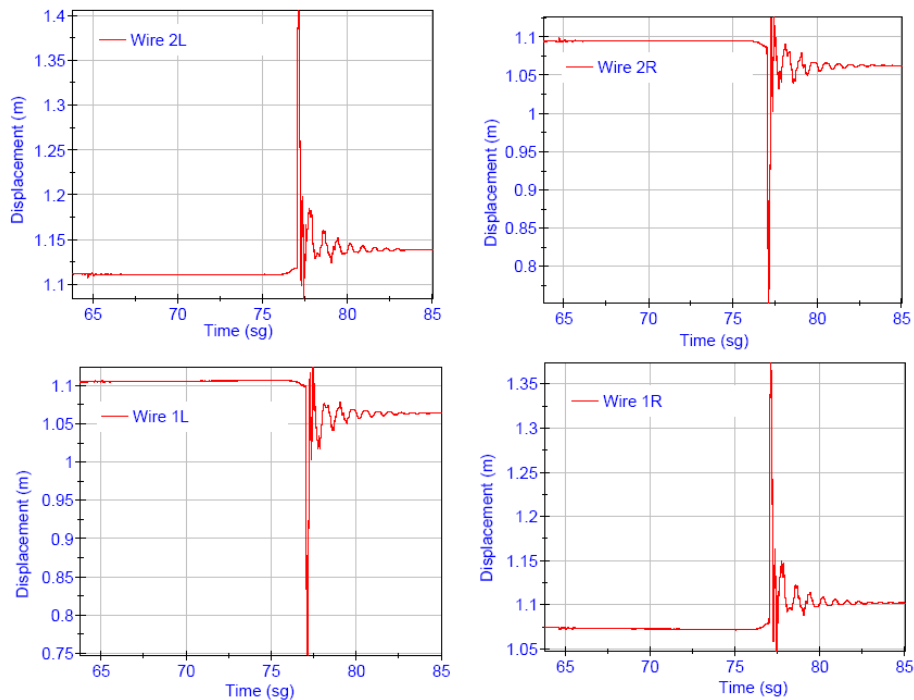


Fig. 14. Sensores de hilo

### MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Para validar los modelos de cálculo realizados se ha comenzado con el ensayo de los pilares descrito en secciones anteriores, usando el programa comercial de elementos finitos ANSYS en su versión 12.0.

Para simular las características de la espuma de relleno se ha utilizado un elemento tipo volumen formado por 20 nodos y con tres grados de libertad por nodo, correspondientes a las translaciones en cada eje de coordenadas, x, y y z. Este tipo de elemento es capaz de asumir comportamientos plásticos, grandes deformaciones y grandes tensiones. En la Fig. 15 se puede observar en color azul la espuma modelada con elemento volumen. En esta misma figura, la zona en rojo simula la piel del pilar.

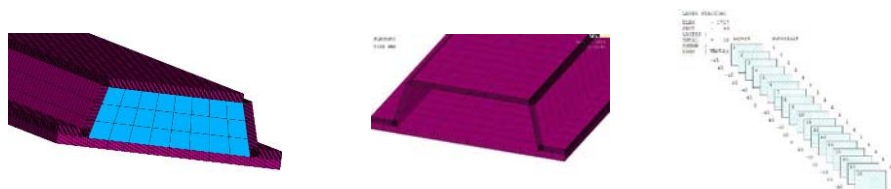


Fig. 15. Modelo de elementos finitos

Para simular el comportamiento de la piel, se ha utilizado elementos tipo placa de 8 nodos con seis grados de libertad en cada nodo. Este tipo de elemento no solo permite reproducir el comportamiento orto-trópico del

material, sino que también permite la introducción de las características constructivas de cada capa, a saber, espesor, dirección de la fibra y material utilizado en cada una de ellas. En la Fig. 15 se puede apreciar el modelo de la sección de la piel del perfil así como un detalle de las capas introducidas en la zona superior de la sección.

Las condiciones de contorno aplicadas durante el ensayo del pilar consistieron en el anclaje del mismo mediante dos placas de acero por su parte inferior, mientras que por su parte superior se aplica la carga mediante chaspas y tornillos tal y como se muestra en la Fig. 2. Para simular el comportamiento del anclaje se han utilizado elementos tipo contacto entre el pilar y un bloque rígido que simula la placa (ver Fig. 16) El elemento de contacto utilizado es capaz de simular tanto contactos como deslizamiento entre dos piezas, tanto en 2D como en 3D. Se sitúa entre los nodos intermedios de los elementos tipo placa y tipo volumen utilizados en este caso.

Para la aplicación de la simulación de la carga se han aplicado desplazamientos en el borde superior del perfil, cuya dirección ha dependido del tipo de ensayo realizado (abriendo o cerrando).

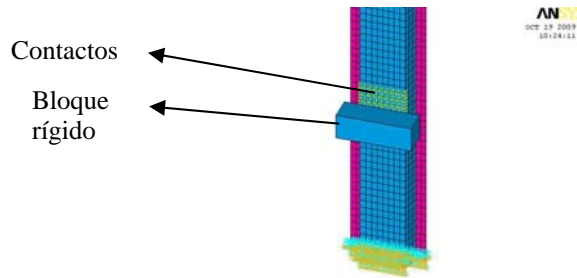


Fig. 16. Condiciones de contorno

Según las especificaciones del fabricante, se introdujeron los valores de las características del material suponiendo que el volumen de fibra era de un 50% con respecto al de resina. De esta forma la curva fuerza desplazamiento obtenida en el modelo de elementos finitos quedaba muy por encima de la obtenida según los ensayos realizados.

Es por esto que se realizó un modelo paramétrico cuyo parámetro de diseño es el volumen de fibra, que varía de entre un 20% y un 45% incrementando dicho volumen en 5 unidades cada vez. Una vez seleccionado el volumen de fibra, se recalculan las propiedades de una capa unidireccional de material según las ecuaciones de la regla de mezcal y se introduce en las características mecánicas de la capa, creando un nuevo material por vez.

Una vez realizado el cálculo con todos los volúmenes de fibras estudiados se obtiene que los volúmenes de fibra que más se aproximan a la realidad son:

Tabla 1. Volumen de fibra utilizado para el cálculo

	'Abriendo'		'Cerrando'	
	Sample nº3	Sample nº 11	Sample nº 6	Sample nº 10
% Vf del FEM	0.35	0.25	0.35	0.25

En las siguientes figuras se puede compara las curvas de fuerza-desplazamiento y momento- ángulo girado, obtenidas en los ensayos con las calculadas según el modelo FE con el volumen de fibra ajustado. Se muestra los resultados obtenidos cuando el pilar está abriendo, siendo similar el caso cuando el pilar está cerrando.

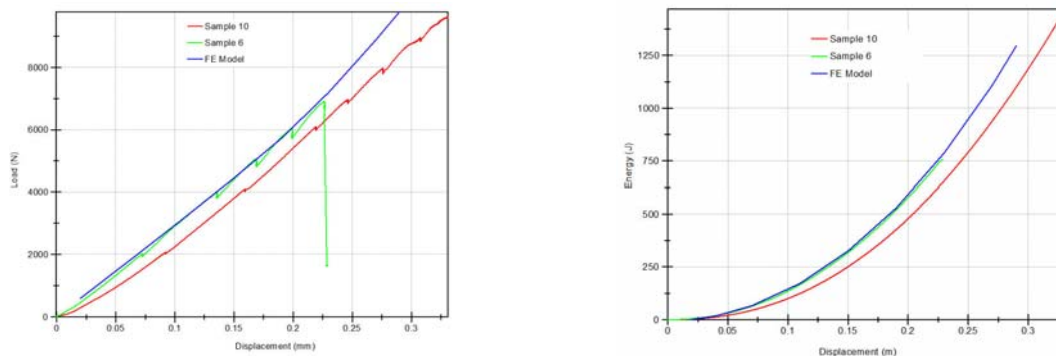
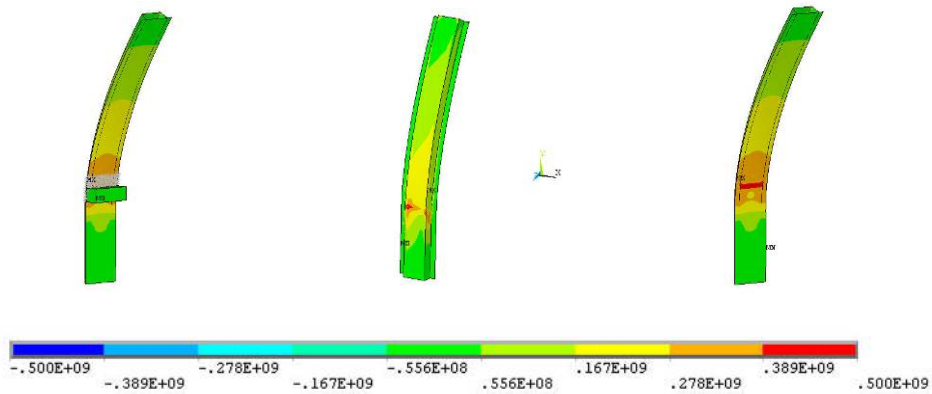


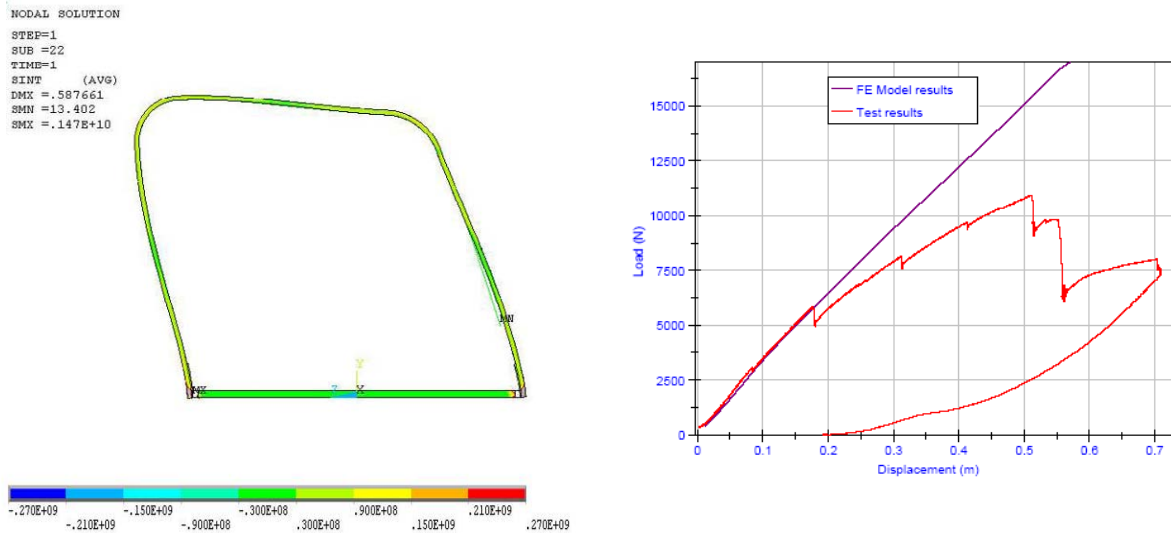
Fig. 17. Comparación de curvas cuando el pilar está 'cerrando'



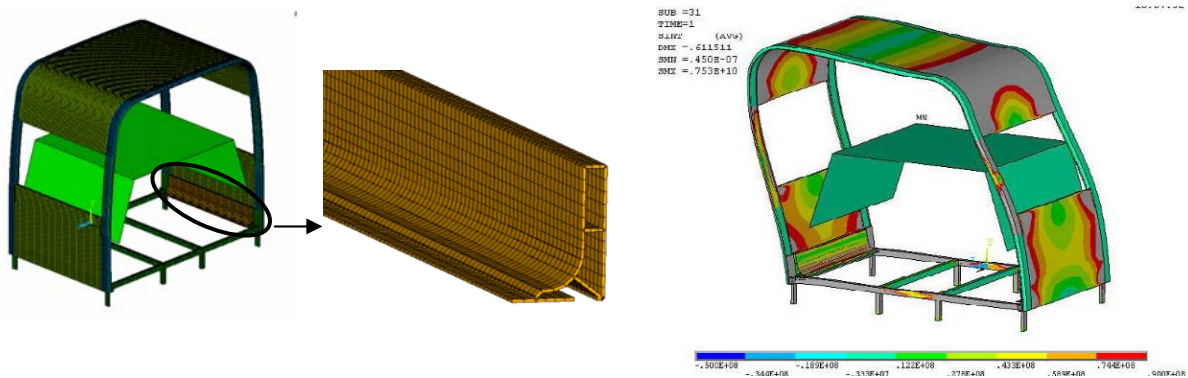
En las siguientes figuras se muestra la intensidad de tensión obtenidas en cada caso



Se procede de igual manera en el caso del ensayo del anillo completo y el ensayo del módulo, adaptando el tipo de material al utilizado en cada caso.



En el caso del modulo se han representado los anillos como en los casos anteriores y se ha implementado con el resto de elementos de conexión teniendo en cuenta las características mecánicas de cada uno de ellos. Se ha supuesto que la zona comprendida entre el piso de butacas y el piso de bodega, fabricada en acero, es rígida por lo que solo se ha simulado la zona comprendida entre el piso de butacas y el techo ambos inclusive.



## CONCLUSIONES

Se han realizado diferentes ensayos de materiales compuestos aplicados, principalmente, a los pilares de la estructura. En todos los casos se han obtenidos comportamientos elásticos de dicho material.

Se ha realizado un ensayo de vuelco de un módulo fabricado en materiales compuesto y se ha demostrado que el espacio de supervivencia no queda invadido por ningún elemento del modulo. Aún así, al ser la energía puesta en juego puramente elástica, no queda absorbida por la estructura por lo que deben ser otros elementos pertenecientes al vehículo quienes deban absorban dicha energía (butacas, pasajeros...).

Se ha desarrollado un modelo paramétrico que identifica el volumen de resina con respecto al de fibra. En todos los casos estudiados se obtiene que el volumen de fibra teórico con respecto al de matriz se ve disminuido entre un 30-50 %, debido al proceso de fabricación.

Se propone, como futuros desarrollos, el estudio de uniones multi-materiales que confieran el material compuesto la capacidad de absorción de energía, cuyas propiedades mínimas a cumplir deben ser definidas en base al conocimiento adquirido en la caracterización y ensayo de uniones metálicas de los actuales vehículos.

## REFERENCIAS

- [1] *LITEBUS*, VI FP, (2006- 2009).
- [2] Ever J. Barberó, *Introduction to Composite Material Design*, Taylor & Francis (1999)
- [3] *Reglamento 66, Revisión 1*, (1997).
- [4] Isaac M. Daniel, Ori Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press (1994).
- [5] Suraj Suraj, *Finite-Element Modeling of a Composite Bridge Deck*, Tesis, College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University (2005).