

OPTIMIZACIÓN DEL BASTIDOR DE AUTOMÓVIL MEDIANTE EL EMPLEO DE MATERIALES ALTERNATIVOS

Javier Abad Blasco, Ingeniero Industrial
 Luis Castejón Herrer, Dr. Ingeniero Industrial
 Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza

Introducción

La tendencia marcada por los fabricantes de automóviles en sus modelos más recientes queda definida por una disminución de consumos y emisiones de contaminantes a la atmósfera, a la vez que se persigue mejorar su comportamiento. En este sentido se busca reducir el máximo el peso mediante el empleo de materiales alternativos al acero, como aluminio o materiales compuestos que presentan elevados valores de resistencia y rigidez específica por unidad de peso. En el caso de los materiales compuestos resulta fundamental aprovechar adecuadamente su anisotropía para maximizar la reducción de peso al diseñar *a medida* cada elemento según las sollicitaciones a las que está sometido.

En este punto se hace imprescindible emplear una herramienta de cálculo, como un código de análisis por elementos finitos, que permita simular y analizar la influencia que sobre el comportamiento final del bastidor tiene cada uno de sus elementos.

Materiales compuestos

Los materiales compuestos presentan dos fases diferenciadas: *la fibra*, que es la que proporciona la rigidez y resistencia; y *la matriz*, que sirve de aglutinante a las fibras permitiendo la transmisión de esfuerzos entre ellas. Además de estos elementos principales existen otros componentes como cargas y aditivos que le dan al material propiedades especiales.

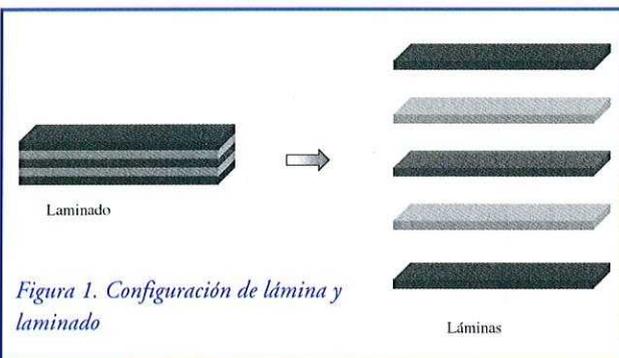


Figura 1. Configuración de lámina y laminado

Dentro de las fibras podemos tener *fibras cerámicas*, como carburo de silicio o alúmina; *fibras metálicas*, *fibras inorgánicas*, como carbono, vidrio o boro y *fibras orgáni-*

cas, tales como aramida. Así mismo, las matrices pueden ser *termoestables*, como epoxi, poliéster o fenólicas; o *termoplásticas*, como el ABS, polipropileno o poliamida.

Los materiales compuestos presentan valores elevados de resistencia y rigidez específicas, debido a su baja densidad, comportamiento inerte a la corrosión y excelente comportamiento a fatiga y elevada absorción de energía en impactos.

Lámina y laminado

Las láminas constituyen el elemento básico del laminado y, dado su pequeño espesor, se apilan para formar el denominado laminado con el espesor y propiedades requeridos.

Las láminas se caracterizan según la orientación de la fibra en ellas, parámetro que define sus propiedades. En la figura 2 se describen tres posibles configuraciones de orientación.

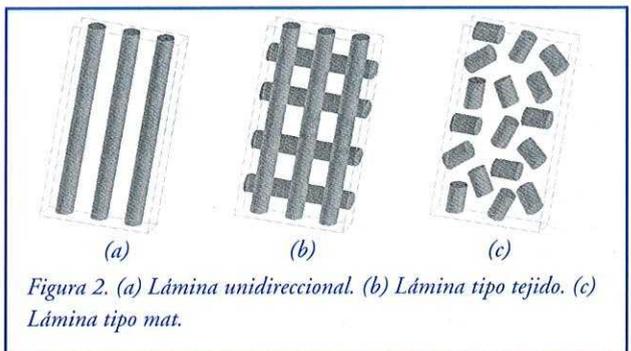
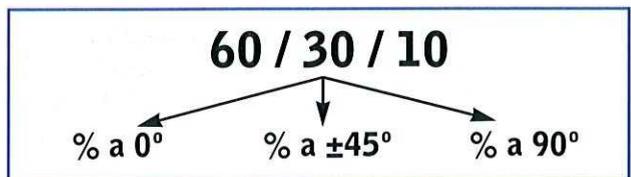


Figura 2. (a) Lámina unidireccional. (b) Lámina tipo tejido. (c) Lámina tipo mat.

La lámina tipo *mat* puede considerarse isótropa y la de tipo tejido presenta ortotropía.

Las propiedades y comportamiento del laminado (Tabla 1) quedan determinados por el número y tipo de láminas que la forman, definiéndose el porcentaje de fibra del laminado en las direcciones: 0° , $\pm 45^\circ$, 90° ; como parámetro para caracterizar sus propiedades. Así, un laminado con el 60% de fibra a 0° , un 30% a $\pm 45^\circ$ y un 10% de fibra a 90° se designa de la siguiente forma.



Configuración	Comportamiento frente a esfuerzo de		
	Flexión y axiales	Torsión y cortantes	
	0°	90°	±45°
Isótropa	Bueno	Bueno	Bueno
0/100/0	Malo	Malo	Excelente
60/30/10	Bueno	Regular	Bueno
80/20/0	Muy Bueno	Malo	Regular
30/70/0	Bueno	Malo	Muy bueno
Unidireccional	Excelente	Malo	Malo

Tabla 1. Comportamiento de laminados según el porcentaje de fibra a 0°/±45°/90°

Requerimientos de diseño

El criterio seguido para la optimización del bastidor ha sido el de rigidez a flexión y a torsión, midiendo los desplazamientos verticales de las vigas longitudinales del bastidor para comparar la rigidez obtenida con las distintas configuraciones analizadas.

En la figura 4 se muestran las deformadas a flexión y torsión de uno de los modelos analizados.

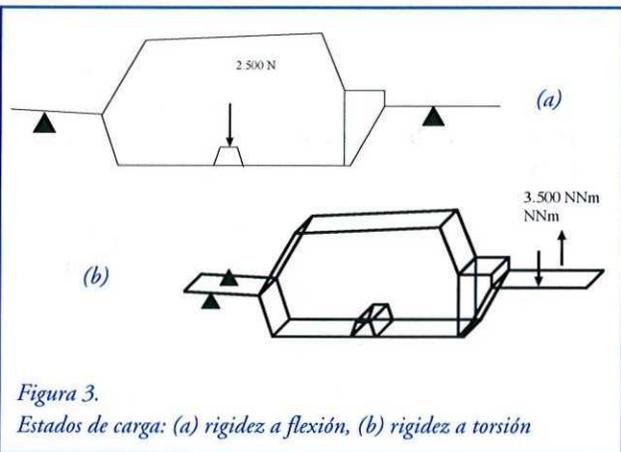


Figura 3. Estados de carga: (a) rigidez a flexión, (b) rigidez a torsión

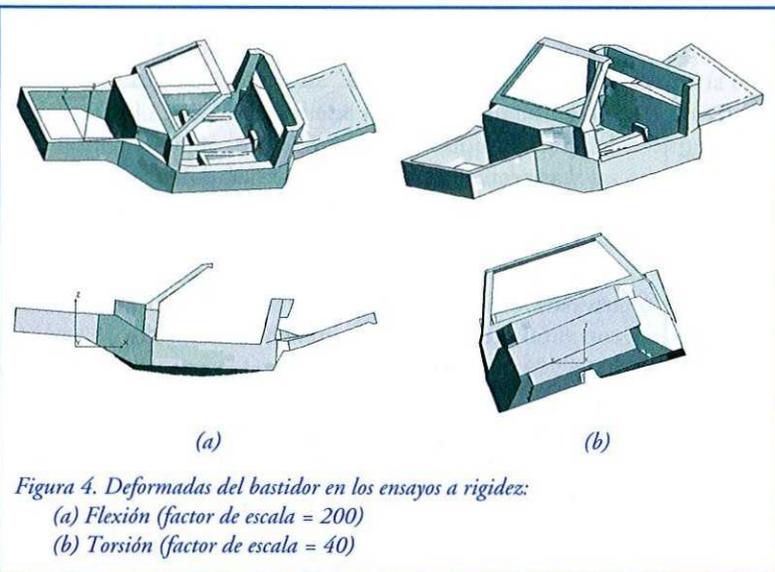


Figura 4. Deformadas del bastidor en los ensayos a rigidez: (a) Flexión (factor de escala = 200) (b) Torsión (factor de escala = 40)

Modelización

Se han analizado tres geometrías distintas de bastidor, definiendo la geometría y realizando un posterior mallado mediante elementos lámina, definiendo diversos grupos de materiales para cada uno de los elementos o subconjuntos en que se ha dividido el bastidor para su optimización. A continuación se han definido los apoyos y cargas de cada uno de los dos ensayos de rigidez: a flexión y a torsión. En la figura 5 se muestra el modelo ya mallado de los tres bastidores analizados.

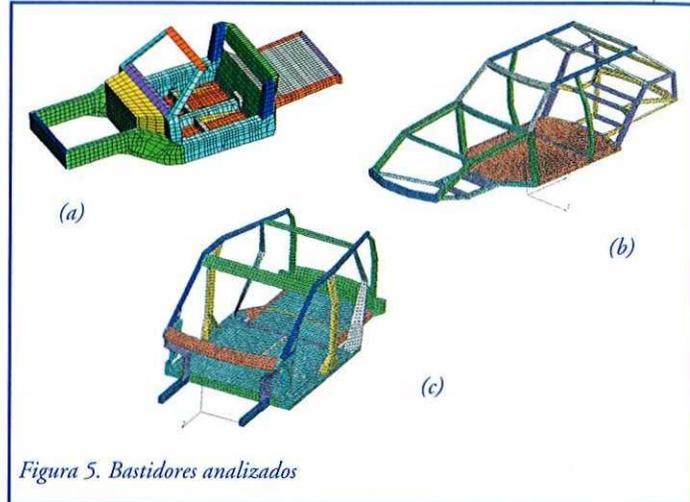


Figura 5. Bastidores analizados

El bastidor (a) de la figura 5 presenta una tipología estructural en la que predominan los elementos placa y vigas cajón de grandes dimensiones, mientras que en el bastidor (b) el elemento predominante es el elemento tipo viga. Por último, el bastidor (c) presenta una tipología similar al (a) pero en este caso es cerrado. Al analizar tipologías diferentes se pretende estudiar la posible influencia de ésta en la optimización del bastidor.

Procedimiento de optimización

El procedimiento seguido en este estudio de optimización del bastidor ha consistido en analizar en primer lugar los bastidores en la configuración de acero, obteniendo unos valores de rigidez que son los que se han tomado como valores de referencia (Figura 6).

Se observa cómo en todos los bastidores el ensayo a torsión es el más desfavorable. A continuación se han analizado en aluminio y fibra de carbono en su configuración isótropa obteniendo un factor de multiplicación, de los espesores iniciales dados en la configuración de acero, de forma que alcancemos los mismos valores de rigidez a torsión que los tomados como referencia y que nos dan los valores de reducción de peso indicados en la Tabla 2.

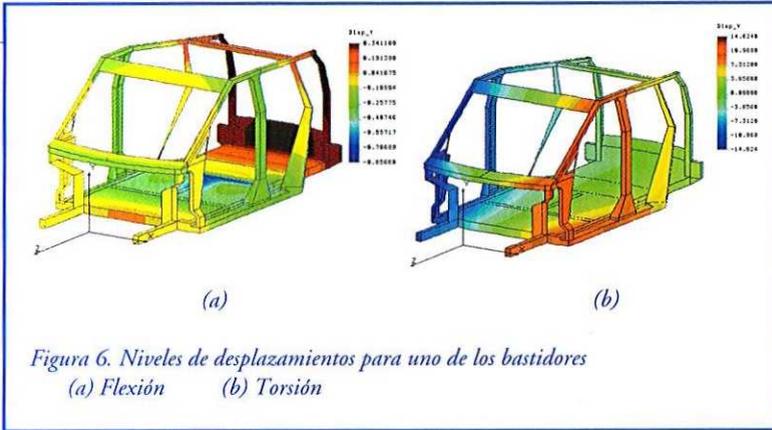


Figura 6. Niveles de desplazamientos para uno de los bastidores
(a) Flexión (b) Torsión

Posteriormente se ha pasado a, partiendo del bastidor en su configuración isótropa, variar la configuración del laminado en cada elemento o subgrupos en que se ha dividido el bastidor para estudiar su influencia en la rigidez global del bastidor y poder definir la mejor configuración de cada parte. En este punto el empleo de un paquete de análisis por elementos finitos es fundamental para ensayar el comportamiento del bastidor sin necesidad de construirlo y ensayarlo para cada una de las modificaciones

Bastidor	Factor multiplicación espesor		Ahorro en peso (%)	
	Aluminio	Fibra de carbono (isótropa)	Aluminio	Fibra de carbono (isótropa)
a	2	2,7	31,2	48,4
b	2,45	3,5	18,6	35,4
c	1,8	2,3	38,1	56,0

Tabla 2. Ahorros de peso con configuración isótropa

que se realicen, con el elevado coste que eso supondría. En este estudio se han realizado más de trescientos análisis.

Con los datos obtenidos se han obtenido unos gráficos de barras en los que, tomando como valor unidad la rigidez del bastidor en carbono isótropo, se indica la variación relativa en la rigidez global del bastidor al modificar la configuración del laminado en el elemento o subconjunto analizado.

En la figura 7 se indica cómo varía la rigidez del bastidor al variar la configuración del laminado en la viga longitudinal trasera (parte resaltada en la figura de la geometría). Se observa cómo la configuración óptima, en el caso de rigidez a torsión que es la más restrictiva, para este elemento es la del laminado en su configuración 0/100/0 por tratarse de un elemento sometido principalmente a esfuerzos de torsión. Tras realizar este análisis para cada uno de los bastidores, se ha podido definir la configuración óptima de cada elemento, obteniéndose las configuraciones indicadas en la figura 8.

Con estas configuraciones optimizadas se resolvieron de nuevo los bastidores y se obtuvieron los ahorros de peso indicados en la tabla 3.

Coste

Aunque el coste por kilogramo de los materiales compuestos es superior al de los materiales metálicos, hay un gran rango de valores en función de la fibra y resina utilizadas. Por ejemplo, la fibra de vidrio presenta un coste aproximado de 250 pta/kg en configuración unidireccional o *roving* y de 400 pta/kg si se trata de un tejido. Por otro lado, si se utiliza fibra de carbono, el coste se incrementa a unas 2.500 pta/kg en configuración

unidireccional o *roving* y hasta 4000 pta/kg si se trata de un tejido. El valor de la resina poliéster se encuentra en torno a 200 pta/kg, mientras que, si se trata de una resina epoxi, el coste es de 500 pta/kg.

Se debe tener en cuenta que el coste final del producto no se encuentra exclusivamente ligado al coste de la materia prima sino también al proceso de fabricación. En este sentido, al utilizar materiales compuestos se consigue evitar el coste ligado a la realización de soldaduras. Además, se logra reducir el coste de mantenimiento, al tratarse de materiales inertes frente a la corrosión.

Por ejemplo, el suelo de la quinta generación del Chevrolet *Corvette*, fabricado con fibra de vidrio y estructuras *sandwich* de núcleo de madera de balsa. Los materiales compuestos se

utilizan en la automoción por su capacidad de generar series largas (SMC, BMC, RIM), bajo coste, mayor ligereza y mejor amortiguación de ruidos y vibraciones.

Reciclado

Es obvio que el uso de materiales compuestos, tanto de fibra de carbono, como aramida o vidrio está creciendo a un ritmo muy alto., hecho que nos plantea necesariamente una cuestión que es general para todos los materiales: qué hacer con el material compuesto una vez finalizada la vida de la pieza.

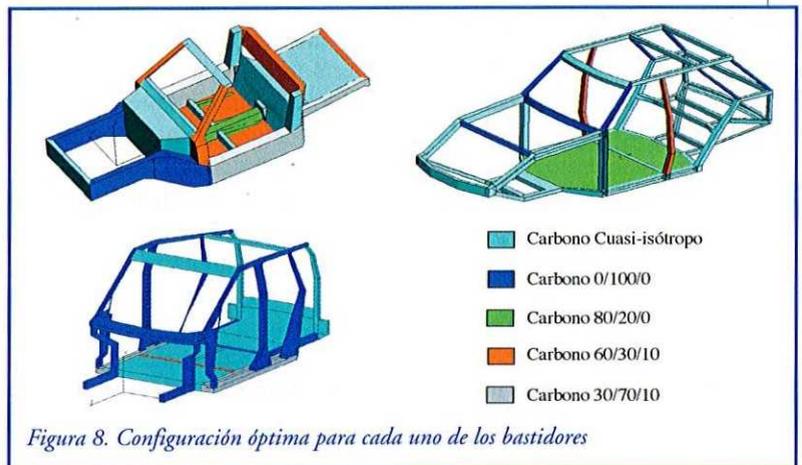


Figura 8. Configuración óptima para cada uno de los bastidores

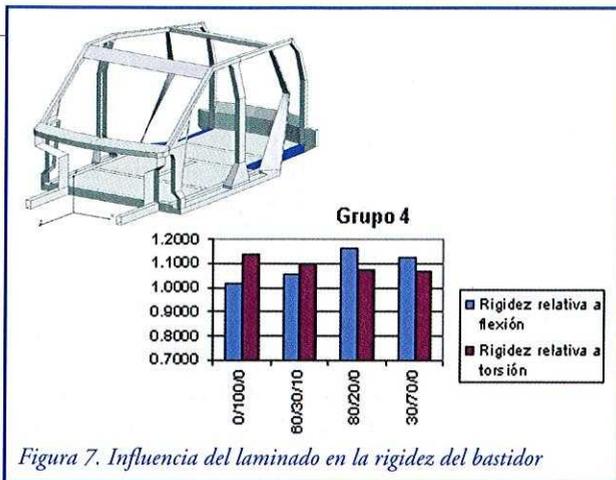


Figura 7. Influencia del laminado en la rigidez del bastidor

La matriz termoplástica puede fundirse aumentando la temperatura, pasando de estado sólido a líquido, lo cual es imposible con matrices termoestables.

La mayoría de los materiales compuestos basados en resinas de poliéster se utilizan para aplicaciones en las que los procesos de fabricación están fundamentalmente basados en el moldeo de láminas (SMC), proyección, o laminación manual con fibras de vidrio, mientras que los materiales compuestos de resinas epoxi y fibras de carbono se utilizan en la industria aeroespacial, especialmente en forma de preimpregnados. Una característica peculiar de la fabricación de los materiales compuestos de matriz termoestable que las diferencia de los materiales con matriz termoplástica es el elevado ratio de desechos que se producen en los primeros y las grandes cantidades de sobrantes desperdiciados que se generan. Esto se debe principalmente al proceso de fabricación manual, que es uno de los más utilizados.

Aunque actualmente hay cantidades suficientes de materiales compuestos de matriz termoestable disponibles para procesos de reciclado, hay un gran número de barreras que hacen muy problemático el reciclado de estos materiales, que se indican a continuación:

- Los materiales compuestos de matriz termoestable no pueden ser reprocesados mediante procesos de refundición.

- La mayor parte del material en muchos materiales compuestos de matriz termoestable está formado por refuerzos minerales inorgánicos como, por ejemplo, la fibra de vidrio.

- Existe un amplio rango de refuerzos utilizados en los materiales compuestos de matriz termoestable y estos aparecen en diferentes proporciones.

- Los desechos de materiales compuestos de matriz termoestable suelen estar contaminados y a menudo contienen insertos metálicos o rigidizadores.

Para maximizar el valor posterior de los constituyentes reciclados de los materiales compuestos basados en resinas termoestables, es necesario recuperar los materiales en la forma más parecida posible a su forma original. En el caso

de fibras provenientes de materiales compuestos de fibra continua, es necesario recuperar las fibras de forma casi continua de manera que sea posible un aprovechamiento de dichas fibras. Sin embargo, la mayoría de las operaciones de reciclado de materiales compuestos recuperan las fibras en forma corta porque los procesos se basan en tecnologías de fragmentación y reducción del tamaño. Estas fibras cortas, sin embargo, sólo se pueden utilizar en la preparación de materiales compuestos de fibra corta.

Conclusiones

De los resultados obtenidos a lo largo de los numerosos análisis realizados, y que se han mostrado de forma resumida en este artículo, se observa cómo la fibra de carbono permite conseguir mayores ahorros en peso que el aluminio, aparte de presentar otras ventajas como insensibilidad a la fatiga. Por otro lado, se pone de manifiesto la importancia de la tipología estructural en la posibilidad de aumentar el ahorro de peso y aprovechar al máximo la anisotropía del material compuesto. Así se aprecia cómo un bastidor en el que predomine la tipología de lámina y sea cerrado, presenta las mejores posibilidades de ahorro en peso, estando en torno al 40% para el aluminio, del

Bastidor	Factor multiplicación espesor		Ahorro en peso (%)	
	Aluminio	Fibra de carbono (isótropa)	Aluminio	Fibra de carbono (isótropa)
a	2,7	2,4	48,4	54,2
b	3,5	3,5	35,4	35,4
c	2,3	1,95	56,0	62,7

Tabla 2. Ahorros de peso con configuración isótropa

55% para la fibra de carbono isótropa y del 65% para la de carbono optimizada. Otro aspecto a considerar en el empleo del material compuesto es de su mayor coste como materia prima, que se reduce cada vez más con el empleo de tecnología más avanzada para su obtención, aunque se ve reducido con los procesos de fabricación empleados y el bajo mantenimiento que requiere este material ya que son insensibles a la corrosión. En cuanto a la reciclabilidad del material compuesto, en la actualidad se reutiliza parte del mismo (sobre todo como refuerzo de fibra corta) aunque se deben conseguir en el futuro mayores tasas de recuperación del material cuando finaliza el periodo de vida de la pieza.

Bibliografía

- A. Miravete, E. Larrodé, L. Castejón, et. al. *Materiales Compuestos. Tomos I y II*. Zaragoza, 2000.
- Timoschenko. *Teoría de placas y láminas*. Ed. Urmo S.A., Barcelona, 1975.
- O.C. Zienkiewicz. *El método de los elementos finitos*. Ed. Reverté. 1980.
- Manuales de COSMOS/M 2.5., Structural Research and Analysis Corporation (SRAC), 1999. ■