

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES SANDWICH EN FUNCIÓN DE SU CONFIGURACIÓN

A.Valea; I.Mondragón; M.L. González

Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente  
Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU  
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao  
Plaza La Casilla nº 3; BILBAO 48012  
[iapvapea@lg.chu.es](mailto:iapvapea@lg.chu.es)

### RESUMEN

En este trabajo se ha planificado la construcción de estructuras sandwich constituidas por un núcleo de espuma de PVC de celda cerrada. Sobre él se han laminado las pieles compuestas por resinas de poliéster insaturado ortoftálico reforzado con fibra de vidrio tipo E de dos presentaciones diferentes, una de ellas un mat de 300g/m<sup>2</sup> y otro un roving sin torsión de 300 g/m<sup>2</sup> paralelo obtenido de un tejido. Con ambos tipos de refuerzo se han hecho diferentes configuraciones. Sobre los sandwich preparados se han realizado diferentes ensayos.

### ABSTRACT

In this work we have considered the problem of sandwich structure construction formed by a core of PVC-foam with close-cell. Over the structure it has been laminated the skin, formed by unsaturated polyester resin (orthophthalic resin) reinforced with glass fiber E-type, with two different presentations, one of them is a mat 300 g/m<sup>2</sup> and the second is a roving without twist of 300 g/m<sup>2</sup> parallel, obtained from woven-fabric. Also, it has been elaborated different configurations with both reinforcement above cited. Finally, with the prepared sandwiches it has been realised different essays.

**ÁREAS TEMÁTICAS:** Aplicaciones prácticas en Ingeniería; Fractura de materiales compuestos

**PALABRAS CLAVE:** Estructuras sandwich; Composites con núcleo PVC; Propiedades TMD.

### 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de los materiales compuestos de matriz polimérica en elementos estructurales viene siendo creciente, sobre todo en aplicaciones avanzadas como la aeronáutica o el sector naval y deportivo. Dentro de los materiales compuestos las configuraciones sandwich adquieren gran relevancia por la libertad de diseño que posibilitan, a la vez que añan propiedades de rigidez y ligereza únicas.

El concepto básico de este tipo de estructura es que el revestimiento soporta fundamentalmente las cargas de flexión, mientras que, el núcleo lo hace con las cargas de cortadura.

Para estudiar el efecto de la configuración de la piel del sandwich sobre el comportamiento en flexión, se han elaborado diferentes especímenes con el mismo núcleo (espuma de PVC de celda cerrada) y diferentes refuerzos estructurales y relaciones fibra/matriz. Los sandwich se han preparado utilizando un técnica de infusión modificada con el fin de poder trasladar los resultados a fabricación industrializada. Posteriormente, los sandwich se han sometido a postcurado en estufa (80°C durante más de 24 h).

Sobre los sandwich preparados, se ha procedido a la extracción de probetas normalizadas con las que llevar a cabo la realización de ensayos en flexión (cf. UNE 53022).

Una conclusión interesante es que, cuando el roving se encuentra presente con orientaciones 0°/90° no se delamina fácilmente y no rompe la fibra. El efecto de la resina laminada en la superficie de la piel es similar al del mat-monocapa, dando un material que se comporta muy bien una vez superado el punto de fuerza máxima.

### 2. EXPERIMENTAL

Para la realización de este trabajo se han preparado estructuras sandwich empleando núcleos de espumas rígidas de PVC sobre las que se han laminado pieles compuestas por resina de poliéster insaturado reforzada con distintas disposiciones de fibra de vidrio.

Se han realizado dos tipos de familias de sandwich en función de las dos espumas utilizadas como núcleo, y, sobre cada una de estas familias se han variado los diferentes refuerzos estructurales y los porcentajes fibra/matriz de las pieles

*2.1.- Materiales. Resina*

Como matriz polimérica de las pieles del sandwich se ha utilizado, en todos los casos, resina de poliéster insaturado ortoftálica tixotrópica preacelerada (Neste Chemicals G-154-TE) con las características siguientes:

- Viscosidad Brookfield (RVT 2/10 rpm, 23°C) = 1100 mPa.s (ISO 2555)
- Contenido en estireno (cf. DFS 4864) = 42% w
- Densidad (cf ISO 2811) = 1,1 kg/dm<sup>3</sup>
- Reticulación (Tiempo de gel a 23°C cf Neste D006) = 20 min

Esta resina fue catalizada, en todos los casos, con peróxido de metiletilcetona al 1,2%, cantidad que, en estudios previos, se encontró que es la más adecuada para garantizar la completa reticulación con los tiempos de gel apropiados.

## 2.2.- Núcleos sintéticos

Como núcleos para las estructuras sandwich se han utilizado dos espumas de PVC.

La primera es una espuma Herex C70,75 (Airex Complex). Es una espuma rígida de celda cerrada, con nula absorción de humedad. De color verde y con las características nominales que se indican a continuación

- Densidad nominal (ISO 845) = 80 kg/m<sup>3</sup>
- Resistencia en compresión (ISO 844) = 1,3 N/mm<sup>2</sup>.
- Módulo en compresión (DIN 53457) = 83,1 N/mm<sup>2</sup>.
- Resistencia en tracción (DIN 53455) = 1,95 N/mm<sup>2</sup>.
- Módulo en tracción (DIN 53457) = 62,9 n/mm<sup>2</sup>.
- Resistencia en cizalladura (ISO 1922) = 1,2 N/mm<sup>2</sup>.
- Módulo en cizalladura (ASTM C 393) = 30 N/mm<sup>2</sup>.
- Alargamiento a rotura (ISO 1922) = 30%
- Resistencia a impacto (DIN 53453) = 0,9 kJ/m<sup>2</sup>.

Los sandwich fabricados con este núcleo llevarán en su denominación la letra "V".

La segunda espuma utilizada como núcleo, en los sandwich preparados, es una del tipo H80 (Divinycell). Es una espuma de celda abierta, de color marrón y con las características nominales que se expresan seguidamente:

- Densidad nominal (ASTM D1622) = 80 kg/m<sup>3</sup>.
- Resistencia a compresión (ASTM D1621) = 1,22 MPa.
- Módulo en compresión (ASTM D1621) = 85 MPa.
- Resistencia en tracción (ASTM D1623) = 2,2 MPa.
- Módulo en tracción (ASTM D1623) = 80 MPa.

- Resistencia en cizalladura (ASTM C273) = 1,0 MPa.
- Módulo en cizalladura (ASTM C273) = 30,8 Mpa.

Los sandwich fabricados con este núcleo llevarán en su denominación la letra "M".

## 2.3. Refuerzos

Como refuerzo se ha utilizado fibra de vidrio E con dos presentaciones distintas.

Por un lado se ha empleado mat M705-300-125 (Owens-Corning de 300 g/m<sup>2</sup>).

Por otro lado se ha empleado una manta unidireccional de roving (mecha de fibra de vidrio sin torsión-paralelos- constituido por 60 cabos) obtenida a partir de un tejido equilibrado M4-300 g/m<sup>2</sup> (Vetrotex Saint Gobain) mediante la eliminación de la trama (o urdimbre) con lo que queda únicamente el roving paralelo equiespaciado.

## 2.4. Preparación de los sandwich

Los sandwich se han fabricado utilizando la técnica de saco de vacío sobre una lámina de vidrio a la que previamente se le había aplicado desmoldeante. El vacío aplicado en todos los casos ha sido entre 88-85 MPa de presión, mantenido durante un mínimo de 4 h.

Después de curadas, las placas han seguido un tratamiento de postcurado con horno a 80°C durante no menos de 24 h

## 2.5. Laminado superficial

Como consecuencia de que las estructuras sandwich, fabricadas por la técnica de vacío, mantienen muy uniforme la relación fibra/resina (siendo además ésta muy elevada, en el entorno de 60-70%), para poder realizar el estudio con diferentes relaciones se decidió laminar monolíticamente sobre las caras de los sandwich una cantidad determinada de resina. Así se generan otras tres subfamilias, dentro de cada sandwich con una misma espuma y refuerzo:

1. Sandwich sin resina superficial laminada
2. Sandwich en los que se ha laminado 0,055 g de resina/cm<sup>2</sup>.
3. Sandwich en los que se ha laminado 0,110 g de resina/cm<sup>2</sup>.

El procedimiento consistía básicamente en depositar la cantidad necesaria de resina catalizada y acelerada sobre una cara del sandwich permitiendo que cure la resina para, posteriormente, proceder a repetir el proceso por la otra cara.

## 2.6. Caracterización y simbología del material

Como se ha descrito anteriormente, con cada espuma se han realizado 5 subfamilias que varían en función del refuerzo de la piel. De este modo se disponen de sandwich que tendrán en su piel:

1. Refuerzo compuesto por un solo mat de fibra de vidrio por cada cara.
2. Refuerzo compuesto por dos mats iguales, uno encima del otro, por cada cara
3. Refuerzo compuesto por un solo mat sobre el que se ha puesto una manta de roving unidireccional (0°) por cada cara.
4. Refuerzo compuesto por un solo mat sobre el que se han puesto dos mantas de roving unidireccionales, de modo perpendicular entre ellas (0°/90°) por cada cara.
5. Exactamente igual a la disposición del punto 4, pero con la orientación del roving ahora a -45°/45°.

Se realizan tres sandwich de cada tipo, a cada uno de los cuales se les aplica el laminado superficial con dos cantidades diferentes de resina, con lo que, en definitiva, se obtienen los sandwich que se simbolizan en las tablas siguientes:

	1.Sin laminado	2. Con 0,055 g/cm <sup>2</sup> resina	3. Con 0,110 g/cm <sup>2</sup> resina
1.mat en monocapa	V-1.1	V-1.2	V-1.3
2. mat en doble capa	V-2.2	V-2.2	V-2.3
3.mat+roving (0°)	V-3.1	V-3.2	V-3.3
4.mat+roving (0°/90°)	V-4.1	V-4.2	V-4.3
5. mat+roving (-45°/45°)	V-5.1	V-5.2	V-5.3

Tabla 1: Tipos y símbolos de los sandwich preparados con núcleos de Herex C 70.75 (espuma de celda cerrada Airex Complex

	1.Sin laminado	2. Con 0,055 g/cm <sup>2</sup> resina	3. Con 0,110 g/cm <sup>2</sup> resina
1.mat en monocapa	M-1.1	M-1.2	M-1.3
2. mat en doble capa	M-2.2	M-2.2	M-2.3
3.mat+roving (0°)	M-3.1	M-3.2	M-3.3
4.mat+roving (0°/90°)	M-4.1	M-4.2	M-4.3
5. mat+roving (-45°/45°)	M-5.1	M-5.2	M-5.3

Tabla 2: Tipos y símbolos de los sandwich preparados con núcleos de H-80(espuma de celda cerrada Divinylcell)

2.7.- Ensayos mecánicos

Se han realizado los ensayos en flexión (cf UNE 53022) sobre los sandwich preparados.

La obtención de probetas se realizó siempre se acuerdo con la citada norma, teniendo en cuenta la variación de espesor de los distintos sandwich.

Los ensayos se han realizado sobre una máquina universal de ensayos Ibertest, utilizando una célula de carga 50kN; con registro y tratamiento informático de datos. Los ensayos se llevaron a cabo a temperatura de 23°C a una velocidad de aplicación de la carga de 2mm/min, con precarga inicial 0,07 kN (para sandwich con la espuma C7075) y de 0,01 kN (para los sandwich con espuma H80). En todos los casos se acondicionaron las probetas como indica UNE 53003 en cuanto a las atmósferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos.

3.RESULTADOS

3.1.- Comportamiento de los materiales sandwich con núcleo de espuma Herex C 70.75 en función del refuerzo.

a) Con refuerzo en forma de Mat en monocapa

En la tabla 3 se recogen los resultados obtenidos para tree probetas sometidas a ensayo de flexión. Los resultados se refieren a un material sandwich con refuerzo en forma de mat-monocapa cuyo contenido e fibra de vidrio se encuentra entre 62% (capa inferior) y 66% (capa superior) y cuyas dimensionaes y parámetros de ensayo se encuentran en la propia tabla 3:

MATERIAL Probetas	V-1.1		
	1	2	3
Fuerza max. (kN)	0,0977	0,1092	0,1156
Fuerza max. media (kN) dispersión		0,1072 6,9	
Resistencia max. (MPa)	11,64	13,0	13,56
Resistencia max. Media (MPa) dispersión		12,80 6,85	
Módulo en flexión (MPa)	1441,8	1541,5	1703,8
Módulo en flexión medio (MPa) dispersión		1562,3 6,97	
Dimensiones (mm) esp/anch/long /dist-apoyos		8,7-21,8- 174,6 / 130,19	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		215,33	

Tabla 3: Magnitudes dimensionales y propiedades mecánicas en flexión para el sandwich V-1.1

El material sandwich V-1.1 se observa que presenta integridad estructural hasta que sucede la rotura por flexión, lo cual sucede por la cara superior de

apoyo del útil (en compresión). Puede comprobarse también que de las tres probetas ensayadas es la que da valores más elevados de resistencia y la que presenta también menor delaminación, rotura o deterioro de la estructura sandwich.

Cuando se estudian los valores de fuerza máxima en flexión para las tres probetas ensayadas, se observa que la dispersión de valores está dentro de lo previsto por la norma ( $\pm 8\%$ ) resultando un valor medio de 0,1072kN.

La resistencia máxima en flexión para las tres probetas ensayadas, se encuentra también dentro de los valores admitidos por la norma ( $\pm 8\%$ ), resultando un valor medio de 12,73 MPa, lo que corresponde con un valor típico para los sandwich empleados en el sector de la construcción y transporte.

Con referencia al módulo, puede notarse la singular constancia que la línea del módulo presenta para estos materiales sandwich, encontrándose igualmente la dispersión de valores dentro de lo permitido por la norma de ensayo ( $\pm 8\%$ ). El valor medio del módulo ha resultado ser 1562,3 MPa, lo que corresponde a un material rígido, superior a lo exigido a las especificaciones de los sandwich para el sector de construcción interior y transporte, sobre los que presenta la notable ventaja de la disminución del peso. Una densidad 215,33 kg/m<sup>3</sup> supone una reducción del peso de una 7 veces respecto a un material preparado por aleación ligera del tipo Al.

b) *Con refuerzo en forma de mat en doble capa (V-2.1)*

Haciendo un estudio similar al efectuado en el anterior apartado 1.a) se observa que cuando se estudian los valores de fuerza máxima en flexión para las tres probetas V-2.1, la dispersión de los valores se encuentra dentro de lo previsto por la norma (siendo en este caso  $\pm 3\%$ ) resultando un valor medio para la fuerza máxima de 0,3187 kN, notablemente elevada, como es fácil deducir.

La resistencia máxima para las tres probetas ensayadas se encuentra dentro de la dispersión de valores permitidos por la norma ( $\pm 3,1\%$ ) y el valor medio para la misma resulta ser 31,60, también notablemente elevado para aplicaciones no estructurales.

Igualmente puede notarse el elevado valor del módulo que resulta ser 2530,8 MPa (con una desviación de valores dentro de lo permitido por la norma, ya que resulta ser ( $\pm 2,5\%$ )).

c) *Con refuerzo en forma de mat-monocapa+ roving unidireccional (0°) (V-3.1)*

Cuando se estudian los valores de fuerza máxima en flexión para este tipo de sandwich se observa que la dispersión se encuentra dentro de lo previsto por la norma ( $\pm 4,9\%$ ) resultando un valor medio para la fuerza máxima de 0,2372 kN. Puede notarse que un pequeño incremento del porcentaje de fibra de vidrio (2%) en forma de roving unidireccional a 0° sobre un refuerzo de mat en monocapa, hace que la resistencia máxima se multiplique por un factor de 2,21 y, aunque tiene un valor menor que el que se consigue con un mat en doble capa también su densidad es menor.

Con respecto a la resistencia máxima, los valores obtenidos se encuentran dentro de la dispersión permitida por la norma ( $\pm 4,9\%$ ) resultando un valor medio de 27,80 MPa; lo que significa que la incorporación de un roving a 0° tiene por efecto multiplicar por 2,17 esta propiedad (aunque sigue siendo inferior a la obtenida con el material con mat en doble capa).

El módulo en flexión para las probetas ensayadas también se encuentra dentro de la desviación admitida por la norma ( $\pm 3,26\%$ ) resultando un valor medio de 2948,3 MPa, valor que evidencia que la introducción de un roving unidireccional hace aumentar en casi 1,9 veces el módulo en flexión del sandwich con respecto al que presenta un mat monocapa con un porcentaje en fibra casi igual. Los valores de los módulos en flexión son similares a los que se obtienen sobre láminas de resina poliéster pero con considerable ahorro de peso.

d) *Con refuerzo en forma de mat-monocapa + 2 capas de roving superpuestas (0°/90°) (V-4.1)*

En este caso los valores de fuerza máxima obtenidos tienen una dispersión, dentro de la prevista por la norma del  $\pm 2,2\%$ , y resulta un valor medio de 0,3473kN. Este valor es 3,23 veces mayor que el obtenido para el sandwich con mat-monocapa y presenta solo un incremento del 4% en el porcentaje de fibra de vidrio del refuerzo.

La resistencia máxima para las tres probetas ensayadas se encuentra dentro de la dispersión de valores permitidos por la norma (resultó ser  $\pm 2,2\%$ ) dando un valor medio de 34,45 MPa.

El valor obtenido para el módulo medio ha sido de 3422 MPa, con una desviación de valores que cae dentro del intervalo previsto por la norma ( $\pm 3,6\%$ ).

Se aprecia una mejora notable en las propiedades mecánicas del material con respecto a la configuración del sandwich con refuerzo de mat-monocapa, aunque hay un aumento del 76% en la

densidad, siendo de cualquier forma un material liviano con claras aplicaciones estructurales.

- e) *Con refuerzo en forma de mat-monocapa + 2 capas de roving superpuestas (-45°/45°) (V-5.1)*

Como en los casos anteriores, tanto los valores de la fuerza máxima como la resistencia máxima y el módulo obtenidos para las probetas, objeto de ensayo, presentan una dispersión que se encuentra dentro de lo permitido por las normas respectivas ( $\pm 5,6\%$ ;  $\pm 3,7\%$  y  $\pm 5,4\%$  respectivamente) siendo el valor medio de la fuerza máxima 0,3006kN; el valor medio de la resistencia máxima 29,807 MPa y el valor medio del módulo en flexión 2799 MPa.

Puede observarse que la orientación de las fibras de roving a  $-45^\circ/45^\circ$ , hacen variar los resultados respecto a los obtenidos en el punto anterior 1.d), teniendo en cuenta que el porcentaje en fibra y la densidad son casi idénticos.

### *3.1.- Influencia de la disposición del refuerzo en el laminado*

Tomando como referencia el material sandwich que tiene mat-monocapa en las pieles, se observa que al añadir una segunda capa de mat se produce un importante incremento en las propiedades mecánicas, tanto en la fuerza máxima que se multiplica por 2,97, como en la resistencia máxima que lo hace por un factor de 2,46 y en el módulo que pasa a ser 1,62 veces mayor. Hay que dejar constancia también del notable aumento en la densidad.

Cuando sobre un sandwich con mat-monocapa se añade un roving unidireccional ( $0^\circ$ ) la mejora de las propiedades es también evidente. La fuerza máxima media aumentar en un factor de 2,15 y el módulo medio en flexión se hace 1,88 veces mayor. En este caso, el aumento en la densidad es menor que en un sandwich con mat en doble capa.

Cuando se compara un sandwich con mat-monocapa + roving ( $0^\circ/90^\circ$ ), con respecto a uno formado con mat-monocapa, se obtienen los mejores resultados, dando factores de crecimiento de 3,23 para la fuerza máxima media; de 2,69 en la resistencia máxima media y 2,19 en el módulo medio. Esta disposición conduce al sandwich con mayor densidad ya que presenta un crecimiento de esta propiedad del 76% con respecto al material con una sola capa de mat.

Los sandwich con mat-monocapa pero con la disposición de las dos capas de roving ( $-45^\circ/45^\circ$ ) también mejoran el comportamiento con respecto al sandwich base de referencia, pero no lo hacen en la misma magnitud que para la orientación ( $0^\circ/90^\circ$ ) aunque tengan la misma densidad. Los factores de

mejora son ahora de 2,80 para la fuerza máxima media; 2,32 para la resistencia máxima media y 1,79 para el módulo en flexión, característica que baja notablemente en este material como consecuencia de la orientación.

### *3.3.- Estudio comparativo del efecto de la resina adicional sobre las pieles*

Para evitar alargarse en la discusión, finalizaremos resumiendo el efecto causado por la adición de resina sobre las pieles, sin hacer el estudio individualizado de cada tipo de sandwich.

En todos los materiales sandwich estudiados, con diferentes refuerzos, la resina superficial laminada genera un incremento en los valores de fuerza máxima. Estos incrementos son más acusados en el caso de que el refuerzo sea únicamente mat-monocapa, multiplicándose por 1,57 para el material con  $0,055 \text{ g/cm}^2$  de resina superficial (V-1.2) y por 2,6 para el material con  $0,110 \text{ g/cm}^2$  de resina superficial (V-1.3) respecto al que no lleva resina superficial. Para los materiales que llevan roving en su refuerzo, el incremento total no es tan grande, variando aproximadamente en factor de 1,4-1,5.

La resistencia máxima se incrementa, como en el caso anterior, de un modo más acusado en el material con mat-monocapa, y en menor grado en el material con roving, aunque en general el incremento no es tan grande como en el caso de la fuerza máxima.

En el caso del módulo a flexión el comportamiento tiene una característica singular y es que, en el caso del sandwich con mat reforzado con roving, permanece constante, es decir, no varía con la resina laminada, independientemente de la orientación del unidireccional. Esto hace pensar que el módulo de estos materiales viene condicionado fundamentalmente por la geometría del sandwich (núcleo-piel) y no es mejorable, como en otros casos, rigidificando la piel (que lleva roving) con resina.

Debe destacarse que la mejora de las propiedades mecánicas se produce de modo más acusado en el caso tercero (es decir cuando lleva mayor cantidad de resina laminada  $0,110 \text{ g/cm}^2$ ) que en el segundo, en el que la mejora es pequeña. Quizá esto puede estar relacionado con una absorción de parte de la resina por el sandwich y no se forma un espesor mínimo crítico de capa, como ocurre en el caso tercero.

**AGRADECIMIENTOS:** Se agradecen las ayudas económicas a la Universidad del País Vasco UPV-EHU y al Gobierno Vasco para el desarrollo del proyecto