

## PROCESAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE ESTRUCTURAS LIGERAS TIPO SÁNDWICH (FC-NÓMEX)

*A. Sánchez Romero<sup>1</sup>, A. Romero Gutiérrez<sup>1</sup>, S. Horta Muñoz<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Industrial y Aeroespacial (EIIA), Instituto de Investigación Aplicada a la Industria Aeronáutica (INAIA), Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), 45071 Toledo, España, [abraham.sanchez@uclm.es](mailto:abraham.sanchez@uclm.es), [ana.rgutierrez@uclm.es](mailto:ana.rgutierrez@uclm.es), [sergio.horta@uclm.es](mailto:sergio.horta@uclm.es)

**Resumen:** Se investiga la influencia de los parámetros de procesamiento en la fabricación de paneles sándwich con pieles de fibra de carbono y núcleo de nómex. Para ello, se analizan siete configuraciones variando el espesor de las pieles y el núcleo, la presión y el vacío en el curado, y la geometría de las celdillas. Se emplearon dos métodos de fabricación: cocurado, donde pieles y núcleo se curan simultáneamente, y coencolado, que utiliza un adhesivo con curado adicional. Los resultados muestran que el cocurado es más eficiente en tiempo, recursos y propiedades mecánicas, pero presenta mayor defectología. Los paneles coencolados, aunque tienen menos defectos, muestran una adhesión piel-núcleo inferior. La variación en la presión y el vacío afecta a la porosidad, mientras que el espesor de las pieles, el núcleo y la geometría de las celdillas influyen en las tensiones soportadas y en la rigidez.

**Palabras clave:** Material compuesto, Estructura tipo sándwich, Polímero reforzado con fibra de carbono, Nómex honeycomb.

### 1. INTRODUCCIÓN.

Los paneles tipo sándwich han tomado protagonismo en las últimas décadas, convirtiéndose en uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción y el transporte, debido a que aportan resistencia y rigidez a las estructuras manteniendo un bajo peso [1, 2]. Estos materiales son utilizados en la industria aeroespacial en suelos, superficies de control e interiorismo de aeronaves, en la industria naval en cubiertas y refuerzos estructurales, en la industria automovilística en carrocerías de automóviles de competición y, en la industria de la energía eólica para la fabricación de palas de aerogeneradores, entre otras muchas aplicaciones [3]. Los paneles sándwich están formados por dos pieles y un núcleo central [2] que permiten obtener un buen comportamiento mecánico en las direcciones contenidas en el plano y optimizar la resistencia del material en la dirección perpendicular al plano. Dependiendo del método de fabricación se pueden obtener dos tipos de estructuras: cocuradas y coencoladas. Las estructuras cocuradas son aquellas que se obtienen mediante la unión de las pieles y el núcleo, ambos sin polimerizar, en una única etapa de curado. Por su parte, las estructuras coencoladas son aquellas en las que las pieles y el núcleo, estando al menos uno de estos componentes ya polimerizado, se une al otro mediante una etapa de curado adicional.

El método y los parámetros de procesamiento de los paneles sándwich y los materiales y adhesivos empleados influyen en sus propiedades, defectología y modo de fallo [3]. Para llevar a cabo un análisis mecánico de este tipo de materiales se realiza una idealización de la estructura, en la que se aproximan las cargas, estableciendo que las pieles son las responsables de soportar las tensiones normales y el núcleo las tangenciales.

Entre las diferentes combinaciones de materiales que se pueden utilizar para la fabricación de paneles sándwich, destaca el uso de pieles de laminados de fibra de carbono (FC) y núcleo honeycomb de nómex, debido a que presentan funcionalidades adicionales respecto a los paneles fabricados con otro tipo de materiales, tales como fibra de carbono o vidrio y aluminio [4]. Algunas de estas son la capacidad de alternar la orientación de las capas para optimizar las propiedades mecánicas de la estructura, la mayor estabilidad a altas y bajas temperaturas, la elevada rigidez específica y resistencia mecánica y a la corrosión.

El objetivo de esta investigación es la obtención de un método de procesamiento óptimo de paneles sándwich (FC-Nómex) respecto a defectología y comportamiento mecánico, así como la determinación del método de fallo de los paneles obtenidos introduciendo variaciones en los parámetros de fabricación, el espesor de las pieles y el espesor, tamaño y geometría de la celdilla del núcleo.

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

#### 2.1. Materiales.

Las pieles de los paneles sándwich han sido obtenidas mediante la laminación de preimpregnados de fibra de carbono *HexPly Epoxy Matrix M79/34%/UD300/CHS* formados por un 34% de resina epoxy M79 y fibras de carbono de alta resistencia UD300 [5], siguiendo una secuencia de laminación  $[0,90]_s$  y  $[0,90]_{2s}$ . Se utilizan núcleos celulares de nómex, cedidos por “*Aernnova Composites S.A.*” y caracterizados por tener celdillas hexagonales y rectangulares de diferentes tamaños y espesores. El adhesivo utilizado en las estructuras coencoladas ha sido *Araldite 2015-1*, que es un adhesivo epoxi bicomponente [6].

Se fabrican siete configuraciones diferentes de paneles tipo sándwich, en las que se introducen variaciones en el método de procesamiento, espesor de las pieles, vacío y presión durante el ciclo de polimerización, espesor del núcleo y tamaño y geometría de celdilla. Las configuraciones estudiadas se presentan en la Figura 1, así como las características de los materiales utilizados en cada configuración. La configuración inicial, utilizada como referencia (C1), se trata de un panel cocurado de piel simple con secuencia de laminación  $[0,90]_s$  y núcleo honeycomb hexagonal con celdilla de diámetro 5.7 mm y espesor 12.7 mm que ha sido conformado aplicando una presión de 2 bar y un vacío de 500 mmHg.

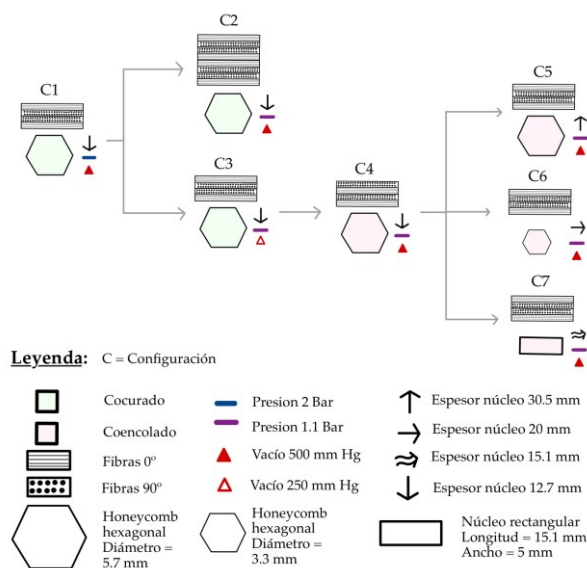


Figura 1. Configuraciones estudiadas.

2.2. Procedimiento experimental.

El proceso de fabricación seguido para estructuras coencoladas y cocuradas se muestra en la Figura 2.

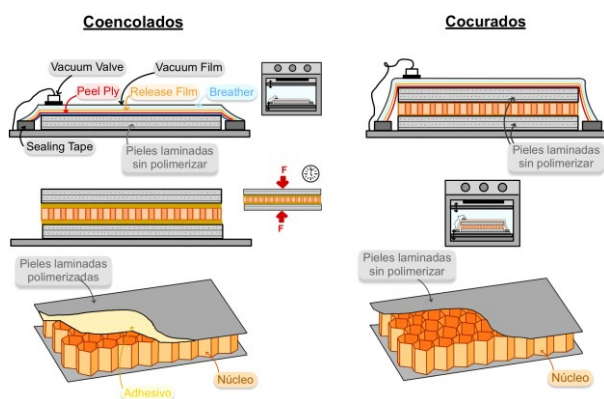


Figura 2. Proceso de fabricación de paneles sándwich.

La fabricación de paneles sándwich coencolados comienza con el atemperamiento de los preimpregnados que, para evitar que se produzca la polimerización de la resina, inicialmente se encuentran en una cámara frigorífica a una temperatura inferior a -18 °C. Los preimpregnados, junto con los materiales auxiliares (Peel Ply, Release Film, Breather y Vacuum Film), son cortados asegurando y cubriendo las dimensiones de la

pieza a fabricar. Posteriormente, se procede a la laminación de las pieles, siguiendo en este trabajo una secuencia  $[0,90]_s$  en las configuraciones de piel simple (todas excepto C2) y,  $[0,90]_{2s}$  en la configuración de doble piel. El proceso de laminación comienza situando la primera capa del laminado sobre una superficie con teflón que evita su adherencia. Antes de la manipulación de cada lámina es necesario atemperar los preimpregnados para conseguir una mayor fluidez de la resina. Después, se coloca dicha lámina sobre la superficie siguiendo la orientación que le corresponda; una vez colocada se aplica presión con un rodillo para asegurar una buena adhesión y que se eliminen las burbujas de aire atrapadas entre la lámina y la superficie inferior. Este proceso se repite para cada capa del laminado siguiendo sus respectivas orientaciones hasta obtener el espesor de piel deseado. Una vez se han laminado las pieles se colocan los materiales auxiliares, se cierra de forma hermética la bolsa de vacío y se procede a realizar la primera polimerización mediante una prensa de platos calientes de Cortázar Systems S.L. El ciclo de curado de las pieles en las estructuras coencoladas y de los paneles en las estructuras cocuradas consta de una meseta de 130 min a 90 °C con una rampa de calentamiento y enfriamiento de 3 °C/min. Para el caso de estructuras coencoladas se utiliza una presión de 1.1 bar y un vacío de 500 mmHg, debido a que no hay riesgo de rotura de las pieles al no estar en contacto con el núcleo. El proceso anterior se realiza por duplicado debido a la necesidad de tener dos pieles para formar el panel sándwich.

Una vez las pieles han polimerizado estas adquieren una alta resistencia y rigidez. A continuación, para obtener el panel sándwich, se lijan las superficies internas de las pieles que estarán en contacto con el núcleo, para así aumentar la adherencia entre ambos materiales. Se limpian con acetona para eliminar los restos de material y se procede a la aplicación del adhesivo mediante una varilla calibrada que permite regular el espesor depositado. Por último, se corta el núcleo, y se cierra el panel sándwich poniendo en contacto el núcleo con las dos pieles mediante las superficies en las que se ha aplicado el adhesivo y, asegurándose de que la secuencia de laminación del panel sándwich completo considerando las dos pieles sigue siendo simétrica y balanceada. Para llevar a cabo la segunda etapa de polimerización, dado que el Araldite es un adhesivo bicomponente con curado a temperatura ambiente, simplemente se aplica presión sobre las dos pieles del panel durante 24 horas para que se produzca el endurecimiento y adhesión.

Para la fabricación de paneles cocurados únicamente se necesita una etapa de polimerización, por lo cual se comienza laminando las dos pieles aplicando presión y temperatura. Se coloca el núcleo en el interior de ambas pieles, los materiales auxiliares recubriendo la pieza sin polimerizar y se procede al cerrado de la bolsa de vacío. Los valores de presión y vacío que mejores resultados han mostrado son 1.1 bar y 250 mmHg, respectivamente, ya que valores superiores daban lugar a defectología en el material. Una vez las muestras han sido fabricadas, se

preparan para el análisis microscópico, utilizando un microscopio óptico *OLYMPUS SZX10* con objetivo de 0.5x, y el análisis mecánico, mediante ensayos de flexión-cortadura y compresión mediante una máquina universal de ensayos *Instron 5969*. Para la realización del ensayo de flexión-cortadura, se establece una velocidad de carga de 2 mm/min y una célula de carga de 50 kN, parámetros comunes en todas las configuraciones. La distancia entre apoyos utilizada para los núcleos hexagonales de 12.7 y 15.1 mm de espesor es 64 mm y para los de 20 y 30.5 mm de espesor es 88 mm. La geometría de las probetas de ensayo sigue las normas para materiales poliméricos ASTM C393 [7] y ASTM C365 [8] para los ensayos de flexión-cortadura y compresión, respectivamente. Para obtener las probetas se lleva a cabo una primera etapa de corte con la cortadora manual *Einhell TE-TC-620*, que permite disminuir el tamaño de los paneles para que puedan ser cortados posteriormente en la cortadora automática (*Struers Secotom-20*), que permite velocidades de corte menores y mejores acabados en las superficies de corte.

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1 Defectología.

Entre los posibles defectos que se han encontrado en los paneles destacan poros, delaminaciones, ondulación de las pieles e incrustación del núcleo en las pieles, todos ellos mostrados en la Figura 3(a-c). La presencia de porosidad se ha comprobado que es más elevada en estructuras cocuradas debido a que por esta vía de procesamiento es más difícil que el aire salga de la estructura durante la polimerización, debido a que posee zonas más cerradas. Por otro lado, la incrustación del núcleo y ondulación de las pieles (Figura 3b) ocurren cuando se utilizan en estructuras cocuradas valores altos de vacío y presión durante la etapa de compactación, lo que da lugar a que el núcleo, con mayor rigidez que las pieles sin polimerizar, penetre en el material y cause una deformación en las pieles en las zonas internas a cada celdilla. Del mismo modo, en el caso de los paneles cocurados, cuando se produce la ondulación de las pieles en la zona central entre los apoyos de cada piel en el núcleo, aunque principalmente la piel superior, se produce una delaminación en cada capa del laminado. Respecto a las estructuras coencoladas (Figura 3c), la tasa de porosidad es muy baja y los poros son de menor tamaño que en los paneles cocurados. Además, se elimina la incrustación del núcleo y la ondulación de las pieles, pero se obtiene una adherencia entre pieles y núcleo de menor calidad.

Del mismo modo, los diferentes métodos de fallo obtenidos se recogen en la Figura 5, observando que en el ensayo de flexión-cortadura, los paneles cocurados fallan por cortante. Al aumentar el espesor de las pieles y se produce fallo por pandeo y, en paneles cocurados, el fallo más común es debido a cortante y delaminaciones.

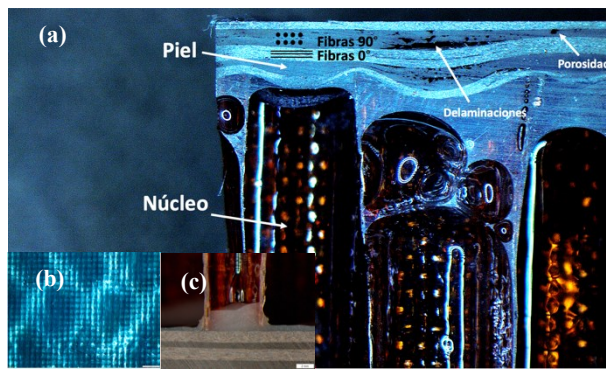


Figura 3. Defectología (a), incrustación del núcleo en las pieles en paneles cocurados (b) y pieles en paneles coencolados (c).

#### 3.2. Análisis mecánico y modo de fallo.

Los resultados obtenidos para las tensiones que soportan las pieles y el núcleo en el ensayo de flexión-cortadura, así como la rigidez a flexión se muestran en la Figura 4.

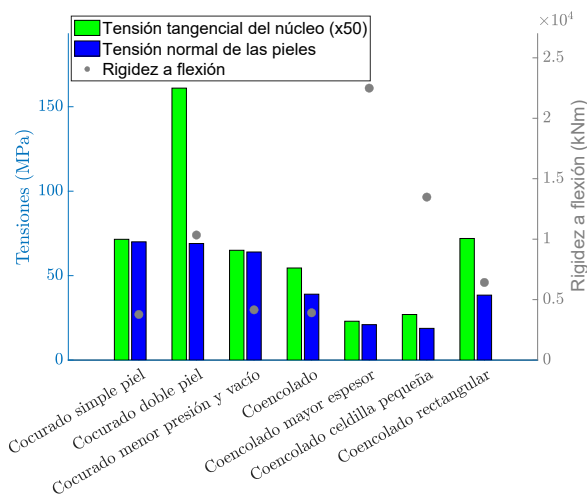


Figura 4. Comportamiento flexión-cortadura y compresión.

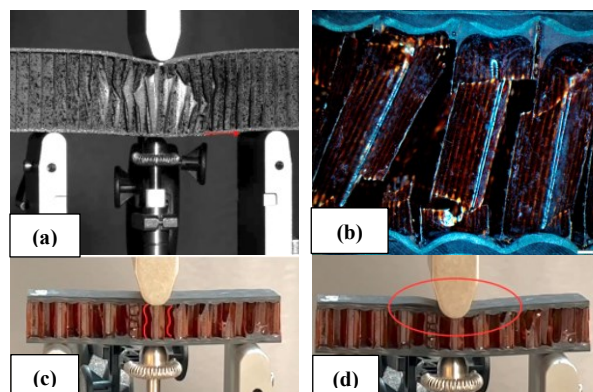
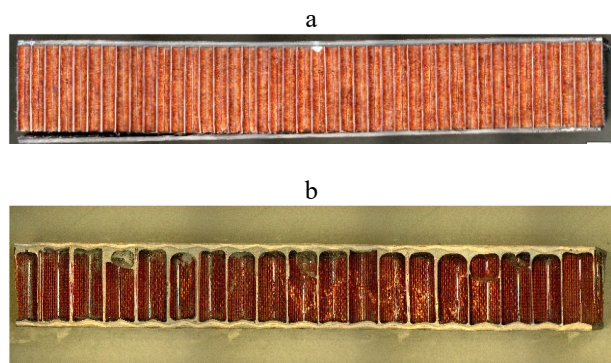


Figura 5. (a) Fallo por cortadura y delaminación en ensayo de flexión-cortadura en paneles coencolados. (b) Fallo por cortadura del núcleo en paneles cocurados. (c-d) Fallo por pandeo del núcleo y las pieles en ensayo de flexión-cortadura en muestras con piel de doble espesor.

Se ha comprobado que al aumentar el espesor de las pieles, incrementa la rigidez a flexión y las tensiones normales soportadas por el núcleo. Sin embargo, el método de fallo genera inestabilidad en el material, lo que debe evitarse, ya que no muestra signos previos en la estructura. Al disminuir la presión y el vacío durante la etapa de compactación, se reduce la incrustación del núcleo, la ondulación de las pieles y la carga máxima soportada, pero aumenta la porosidad. Esto provoca una ligera disminución en la resistencia del material debido a que los poros actúan como concentradores de tensión. El procesamiento de los paneles mediante la ruta de coencolados da lugar a un comportamiento mecánico inferior, resultado de una falta de adhesión entre las pieles y el núcleo, aunque los componentes se mantienen libres de defectos. Por otro lado, al aumentar el espesor del núcleo, la rigidez y la carga máxima también aumentan, aunque las tensiones disminuyen, ya que la carga se distribuye en una mayor área. Además, reducir el tamaño de las celdillas mejora la carga máxima y aporta una mayor rigidez a flexión. Por último, el uso de celdillas con geometría rectangular incrementa las tensiones tangenciales soportadas por el núcleo en la dirección favorable del material y facilita la fabricación de paneles curvos.

El aspecto final de los paneles cocurados y coencolados después del ensayo de flexión-cortadura se muestra en la Figura 6. Aunque los paneles parecen conservar una apariencia que sugiere una resistencia similar a la original tras el fallo, se realizó un nuevo ensayo de flexión-cortadura en un panel que ya había fallado previamente. Los resultados mostraron que la rigidez a flexión se reduce significativamente, alcanzando valores un 86% menores que los iniciales. En la Figura 6 (arriba) se muestra un panel coencolado tras su rotura, donde se aprecia fácilmente la delaminación que ha tenido lugar entre el núcleo y la piel inferior. Por otro lado, en la Figura 6b se aprecia que ha tenido lugar la rotura del núcleo debido a las grietas sucedidas en el material.



**Figura 6.** Aspecto de los paneles coencolados (a) y cocurados (b) tras el ensayo de FC.

#### 4. CONCLUSIONES.

El método de fabricación de estructuras coencoladas es el método más adecuado desde el punto de vista de defectología. Sin embargo, la unión entre los materiales es mejorable, por lo que hay que investigar más en ella y

explorar nuevas formas de adhesión más efectivas. Por otro lado, el método de procesamiento de cocurados es el más eficiente desde el punto de vista industrial debido a que utiliza menos materias primas y consume menos tiempo. Sin embargo, es necesario optimizar más los parámetros de curado para evitar la incrustación del núcleo y ondulación de las pieles. Respecto a las propiedades mecánicas de los paneles, es posible obtener mayores valores de resistencia y rigidez aumentando el espesor de los materiales o disminuyendo el tamaño de celdilla del núcleo.

#### 5. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo es parte de los proyectos PDC 2021-121154-I00, PID2022-137387OB-I00 y SBPLY/23/180225/000114 financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033, Unión Europea Next Generation EU/PRTR, FEDER Una manera de hacer Europa y Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, y de las ayudas 2024-TRAN-36740, 2024-TRAN-36750 y 2022-GRIN-34105 de la Universidad de Castilla-La Mancha. Por último, se agradece a la compañía *Aernnova Composites S.A.* la cesión del material de estudio.

#### 6. REFERENCIAS.

- [1] M. He y W. Hu, "A study on composite honeycomb sandwich panel structure", *Materials & Design* 29 (3) (2008) 709-713.
- [2] W. Harizi, J. Anjoul, V. A. Acosta Santamaría, Z. Aboura y V. Briand, "Mechanical behavior of carbon-reinforced thermoplastic sandwich composites with several core types during three-point bending tests", *Composite Structures* 262 (2021) 113590.
- [3] K. Naresh, R. A. Alia, W. J. Cantwell, R. Umer y K. Khan, "The effect of core gap on different facesheet thicknesses of Nomex honeycomb sandwich structures subjected to in-plane compression", *Structures* 63 (2024) 106409.
- [4] J. K. Paik, A. K. Thayamballi y G. S. Kim, "The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels", *Thin-Walled Structures* 35 (3) (1999) 205-231.
- [5] Hexcel, "Preimpregnado o prepreg HexPly M79", <https://csr.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg>. [Último acceso: 28 09 2024].
- [6] Huntsman, "Araldite", <https://www.huntsman.com/products/araldite2000> [Último acceso: 21 02 2025].
- [7] American Society for Testing & Materials (ASTM), "Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions" (2020).
- [8] American Society for Testing & Materials (ASTM), "Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores". ASTM C365/C365M-22 (2022).