

Paneles fabricados mediante curado UV de prepregs fuera de autoclave reforzados con perfiles de pultrusión UV

I. Ruiz de Eguino¹, G. Goenaga², A. Arruti¹, I. Saenz-Dominguez³, I. Tena¹, F. J. Vallejo², M. Sarrionandia¹, Jon Aurrekoetxea¹

1 Departamento de Mecánica y Producción Industrial, Mondragon Unibertsitatea, Loramendi 4, 20500, Mondragón (Gipuzkoa), Spain

2 Departamento de procesos de fabricación, IDEKO, Arriaga Industrialdea 2, 20870 Elgoibar (Gipuzkoa), Spain

3 Irurena Group, Ctra. de Tolosa s/n, 20730, Azpeitia (Gipuzkoa), Spain

Abstract

En el presente trabajo se ha demostrado el potencial de la tecnología de curado UV cuando se aplica en los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio. Se han comparado dos vías de fabricación de paneles; la fabricación por separado de ambos elementos y su posterior adhesivado, y la integración directa de los perfiles en el curado UV de las pieles. Los resultados de ensayos interlaminares demuestran que la resistencia de la unión prepreg/perfil es equiparable a la de la unión prepreg/prepreg. Consecuentemente, los prototipos obtenidos con ambas estrategias muestran prestaciones mecánicas similares, tanto en rigidez como en resistencia a la flexión. Por último, la baja temperatura con la que se da el curado UV de la piel permite utilizar núcleos hidrosolubles fabricados mediante impresión 3D que facilitan las operaciones de laminado y la compactación.

 **OPEN ACCESS**

Published: 31/07/2023

Accepted: 10/01/2023

Keywords:

Pultrusión
UV curing
OoA prepreg
Curado UV
Panel rigidizado
Prepregs fuera autoclave

1. Introducción

Los materiales compuestos, gracias a sus elevadas propiedades específicas, buena resistencia a la corrosión y libertad de diseño, están en la agenda estratégica de muchos sectores de gran valor añadido como la aeronáutica, automoción, vehículos industriales, naval, ferroviario o ingeniería civil [1]. Una de las estructuras más comunes en este tipo de aplicaciones son los paneles rigidizados por perfiles. Existen muchos prototipos que demuestran la validez funcional/estructural de los materiales compuestos, pero su industrialización no es en muchos casos posible debido a sus procesos de fabricación laboriosos y lentos [2]. Para hacer frente a estos retos, muchas investigaciones se han centrado en la automatización y en tecnologías de curado rápido. En la primera prioridad, la automatización, la fabricación de placas mediante prepregs fuera del autoclave y de perfiles mediante pultrusión son dos de las tecnologías más prometedoras. En lo que a las tecnologías de curado rápido, por un lado, se están desarrollando nuevas resinas de alta reactividad térmica, y por otro, se están explorando nuevos métodos como el curado por microondas o por radiación ultravioleta [3]. El curado UV ha demostrado ser el más rápido de todos, y al combinarlo con los prepregs fuera de autoclave y la pultrusión permite nuevos paradigmas de fabricación. Las principales ventajas de los prepregs curados por UV son [4,5]; la posibilidad de almacenarlos a temperatura ambiente con largas fechas de caducidad, el tiempo de manipulación indefinido para realizar las operaciones de laminación, la mayor velocidad de curado y la reducción de la emisión de elementos orgánicos volátiles. En el caso de la pultrusión, el curado UV del perfil a la salida del molde-hilera reduce las fuerzas de tiro un orden de magnitud, permitiendo el tirado con brazos robóticos, y como el material no está curado, se pueden realizar trayectorias de tiro curvas [6,7]. De esta manera se pueden fabricar perfiles con diferentes curvaturas sin la necesidad de operaciones/utillajes adicionales. Los moldes y utillajes necesarios para la fabricación de piezas con un nivel elevado de integración funcional, como los paneles con rigidizadores del presente estudio, son complejos y costosos de fabricar. La fabricación aditiva es especialmente interesante para la fabricación de estos moldes/utillajes complejos [8], ya que reduce el tiempo de desarrollo y fabricación, a la vez que mejora la funcionalidad al permitir integrar elementos de ayuda en el posicionamiento/fijación para la laminación, el curado y el post-procesado.

El objetivo del presente trabajo consiste en validar la integración de ambas tecnologías, para lo que se compararán dos vías de fabricación de paneles: la fabricación por separado de ambos elementos y su posterior adhesivado, y la

integración directa de los perfiles en el curado UV de las pieles. Se explorará la fabricación mediante impresión 3D de núcleos funcionales para la ayuda de la fabricación. La viabilidad se medirá en términos de resistencia de la intercara prepreg/perfil pultruido, nivel de curado y compactación del prepreg y comportamiento a flexión del prototipo.

2. Técnicas experimentales

2.1. Fabricación del prototipo

El diseño del prototipo se muestra en la Figura 1a, y consiste en una piel plana de 75 mm de anchura y 3 mm de espesor, sobre la que se integra un perfil pultruido con sección en forma de omega y espesor de 3 mm (Figura 1b). La longitud del prototipo es de 300 mm. El refuerzo utilizado tanto para el perfil pultruido como para la piel prepreg es el mismo, una banda cuasi-unidireccional de fibra de vidrio-E (300 g/m²) con un 92% de las fibras en sentido longitudinal y un 8% en transversal para mantener la cohesión de la banda. El perfil pultruido se fabricó en las condiciones especificadas en la publicación [7], mientras que el prepreg se obtuvo como se describe en la referencia [4].

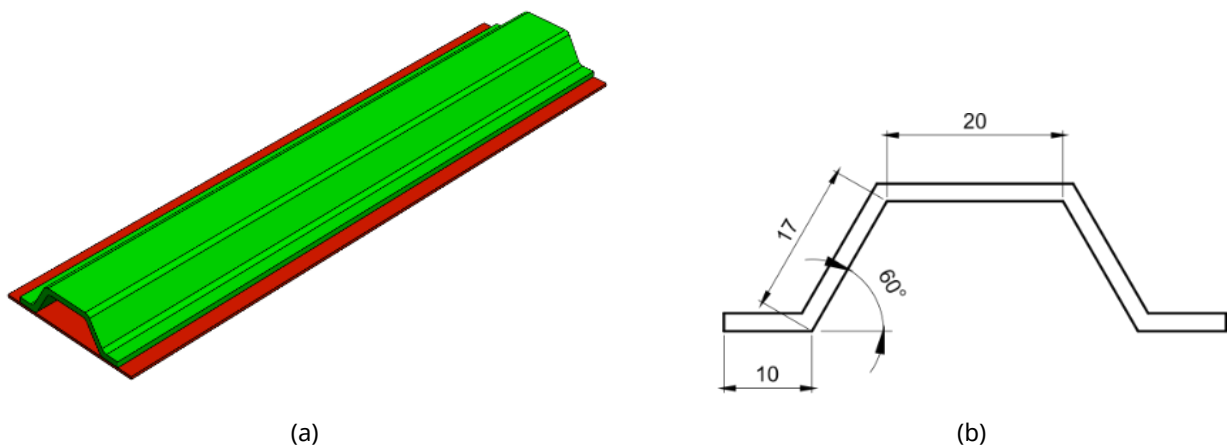


Figura 1. Diseño del prototipo (a) y sección transversal del perfil pultruido (b).

La integración de ambos subcomponentes se realizó siguiendo dos estrategias; la fabricación por separado de ambos elementos y su posterior adhesivado, y la integración directa de los perfiles en el curado UV de las pieles. En el primer caso el adhesivo empleado fue un epoxi bi-componente Loctite EA 9466, y ambos subcomponentes estaban completamente curados en la fase de integración. El curado del adhesivo se realizó a temperatura ambiente y aplicando presión mediante un utillaje de fijación. En el segundo caso se estudiaron dos posibilidades; irradiar por la parte del perfil pultruido (Figura 2a) e irradiar por la parte de la piel (Figura 2b). En ambos casos el perfil pultruido estaba completamente curado, por lo que la adhesión se atribuye al curado de la piel prepreg. La compactación durante la integración de ambos subcomponentes se realizó con una membrana flexible de silicona (TDS-PLS-XX-601200-XXX-S, Merefesa) de 1 mm de espesor. Para curar la piel se utilizaron lámparas UV HONLE-LEDLINE 500 con un pico de emisión a 405 nm e intensidad nominal de 130 mW/cm².

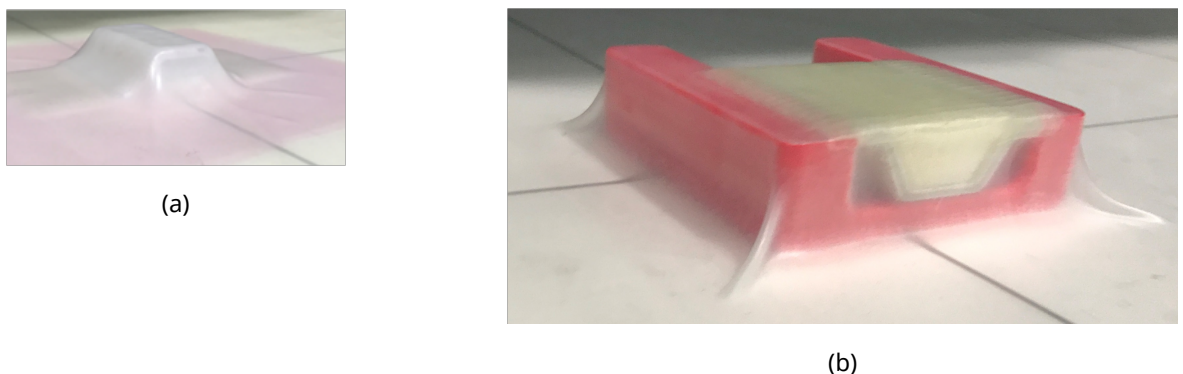


Figura 2. Estrategias de irradiación UV por el perfil pultruido (a), y por la piel prepreg (b).

La principal diferencia entre ambas variantes son la incidencia de la radiación UV y el soporte sobre el que se compacta la piel prepreg. En lo que se refiere a la radiación, cuando se irradia por la parte del perfil, la luz UV debe

atravesar la membrana, el espesor del perfil pultruido, además de la distancia entre el perfil y la piel. En el otro caso, la radiación incidente debe traspasar solo la membrana. En ambos casos se realizaron medidas para determinar la intensidad de luz que incidía en el prepreg. En lo que se refiere a la compactación, cuando se irradia por la parte de la piel esta queda en voladizo sobre el perfil, por lo que se ha utilizado un núcleo de material soluble en agua fabricado mediante impresión 3D como soporte. El diseño del núcleo corresponde a la cavidad que queda entre el perfil y la piel, con un espesor de pared de 0,5 mm y un relleno hexagonal del 20%. El núcleo se fabricó en PVA (eSUN) con una impresora 3D de extrusión de filamento (Raise 3D Pro2). El tiempo necesario para disolver el núcleo en agua a 23 °C es de 75 minutos.

2.2. Caracterización de la resistencia de la intercara prepreg/perfil

Se ha empleado el ensayo de flexión 3 puntos con probeta entallada (4ENF) [9] para evaluar la adhesión entre el laminado de los perfiles pultruidos y los prepregs de curado UV. De esta manera, se ha podido determinar la carga máxima soportada por las probetas al inicio de la propagación de la fractura en modo II. La distancia entre apoyos era de 100 mm y entre pisadores de 60 mm. Las probetas ensayadas tenían unas dimensiones de 140 mm × 15 mm y un espesor de 4 mm, además de contar con una pregrieta (a_0) de 35 mm generada mediante un film de teflón insertado en el proceso de laminación. A cada probeta primero se le aplicó una carga para generar una grieta inicial de 5 mm a partir de la pregrieta, y después se ensayaron a una velocidad de 1 mm/min hasta que la grieta volvía a propagar.

2.3. Caracterización a flexión del prototipo

La validación estructural del prototipo se realizó mediante un ensayo de flexión en tres puntos con una distancia entre apoyos cilíndricos de 260 mm (Fig. 3). Los ensayos se realizaron en una máquina universal de ensayos HOYTON HM-D equipada con una célula de carga de 100 kN, y el desplazamiento se registró a partir de la posición del cabezal de la máquina. Las condiciones en las que se realizaron los ensayos fueron 23 °C, con una humedad relativa de 55% y una velocidad de desplazamiento del cabezal de 5 mm/min. Por cada tipo de prototipo se realizaron tres ensayos.

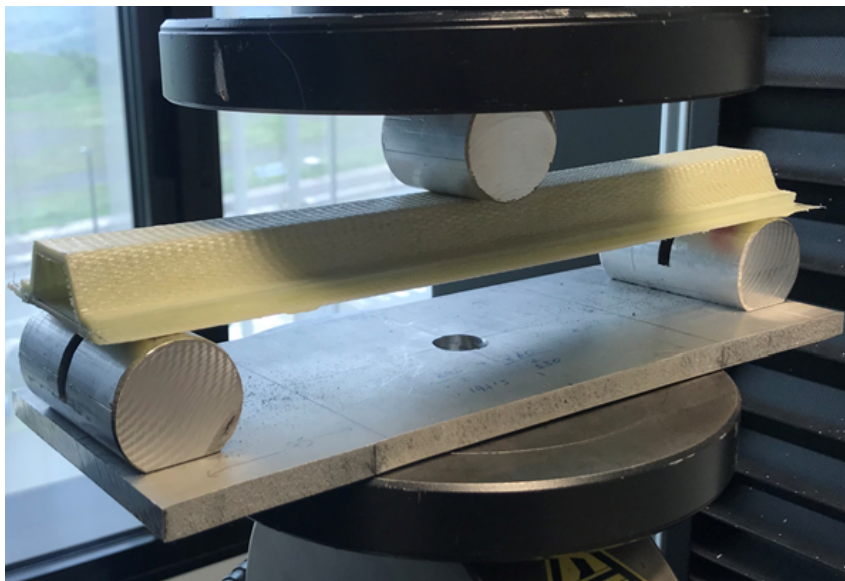


Figura 3. Configuración del ensayo de flexión en tres puntos del prototipo.

3. Resultados y discusión

3.1. Calidad del prototipo

Desde el punto de vista funcional, la primera cuestión a responder es la resistencia de adhesión entre el prepreg y el perfil pultruido, y los resultados del ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probeta entallada demostraron que la fuerza máxima de ambos tipos de probetas es prácticamente la misma, 706 ± 20 N para las probetas fabricadas exclusivamente con el prepreg y 688 ± 11 N para las probetas prepreg/perfil. La propagación de la fisura se produjo en ambos casos a través de la intercara de unión. El segundo aspecto por verificar es el curado, lo que está directamente relacionado con la intensidad de luz que recibe la resina. En la Figura 4a se muestran el porcentaje de la intensidad original de las lámparas para diferentes posiciones. La presencia de la membrana reduce un 24% la intensidad, lo que equivaldría a las condiciones de curado por el lado de la piel, pero en el caso de irradiar por la parte del perfil solo el

1% de la intensidad sería útil para curar la piel. Cuando la radiación UV se realiza por la parte de la piel, el tiempo de curado fue de menos de 5 minutos. Por último, se estudió el nivel de compactación de la piel. En las probetas irradiadas por la parte del perfil, la piel presentaba claros síntomas de falta de compactación en el interior del perfil (Figura 4b). Para evitar este problema se fabricaron unos núcleos mediante SLA con la resina *HighTemp* de Formlabs en una impresora 3D Form2. La selección de este material se decidió basándose en los buenos resultados obtenidos como material para moldes de LightRTM con curado UV [10]. El nivel de compactación mejoró, pero el tiempo de exposición UV se alargó tanto que no lo haría viable para una producción en un entorno industrial. Cuando el curado se realizó por la parte de la piel con el núcleo hidrosoluble, combinado con la presión directa de la membrana, se consiguió compactar adecuadamente el laminado.

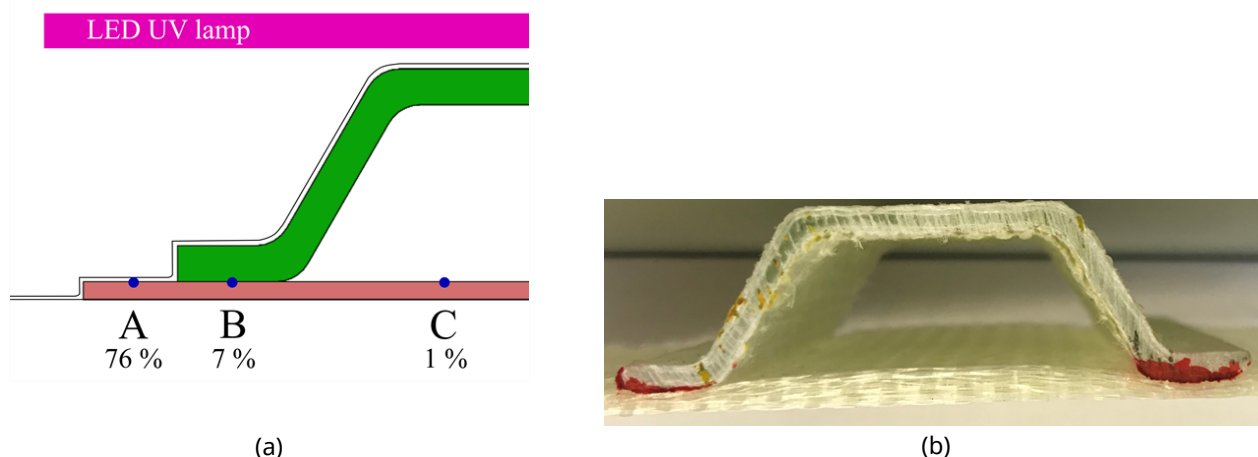


Figura 4. Intensidad incidente en diferentes puntos del prototipo (a), y falta de compactación de la piel cuando la irradiación se realiza por el lado del perfil pultruido (b).

3.2. Comportamiento a flexión del prototipo

En la Figura 5a se muestran las curvas representativas de flexión de los dos tipos de perfiles. Como se puede observar, el dominio elástico de ambos prototipos es prácticamente idéntico, pero lo realmente interesante es que la resistencia y el modo de fallo en ambos casos es también idéntico. La fuerza máxima para el prototipo adhesivado fue de 3419 ± 45 N, mientras que en el integrado durante el curado UV fue de 3440 ± 12 N. En ambos casos la intercara entre piel y perfil no presentó ningún tipo de mecanismo de fallo, ya que el pico de fuerza se generó durante el daño generado por la compresión del pisador (Figura 5b).

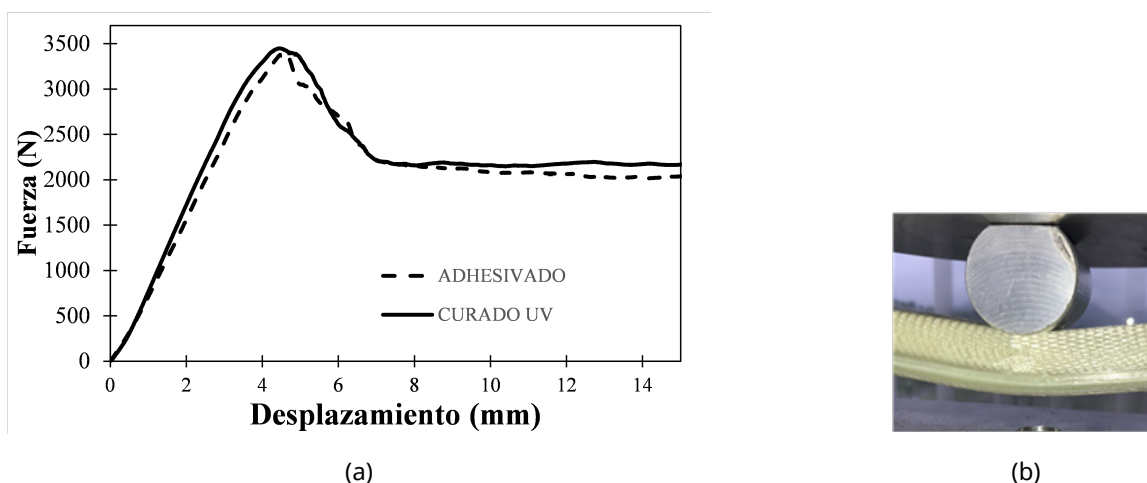


Figura 5. Curvas de flexión de los prototipos adhesivados e integrados durante el curado UV (a), y detalle del modo de fallo del prototipo (característico de los dos prototipos) (b).

4. Conclusiones

La principal conclusión del presente trabajo es que la integración de pieles de prepreg con perfiles de pultrusión

utilizando una estrategia en la que la piel se cura mediante UV directamente en el molde es tan eficiente como el procesado de cada uno de los subcomponentes por separado y su posterior ensamblaje mediante adhesivos. Esto abre la posibilidad de reducir los tiempos de fabricación para estructuras complejas. Es de especial relevancia el resultado de la resistencia de la intercara de unión piel/perfil, ya que es prácticamente la misma que la interlaminar del prepreg. El estudio también ha demostrado que el curado UV no genera altas temperaturas, por lo que se pueden utilizar núcleos hidrosolubles fabricados mediante impresión 3D, habitualmente de baja temperatura máxima en servicio. Por último, este trabajo es una prueba de concepto, de ahí que se haya seleccionado un prototipo en forma de viga plana, pero tanto la pultrusión UV fuera del molde como los prepregs de curado UV permiten fabricar paneles con curvaturas complejas, por lo que la libertad de diseño es otra de las ventajas de la tecnología presentada en el trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida por parte del Gobierno Vasco para la realización de este proyecto de investigación (KK-2020/00019).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] GONZÁLEZ, C.; VILATELA, J.J.; MOLINA-ALDAREGUÍA, J.M.; LOPES, C.S.; LLORCA, J. Structural composites for multifunctional applications: current challenges and future trends. *Prog Mater Sci* 89 (2017) 194–251. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.005>.
- [2] HENNING, F.; KÄRGER, L.; DÖRR, D.; SCHIRMAIER, F.J.; SEUFFERT, J.; BERNATH, A. Fast processing and continuous simulation of automotive structural composite components. *Composites Science and Technology* 171 (2019) 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.12.007>.
- [3] HAY, J.N.; O'GARA, P. Recent developments in thermoset curing methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 220 (2006) 187–195, 2006.
- [4] ARANBURU, A.; VALLEJO, F.J. Desarrollo y automatización de nuevo proceso de fabricación de composites basado en preimpregnados de curado ultravioleta. *Materiales Compuestos*, [S.l.], v. 3, n. 3, p. 21-28, July 2019. ISSN 2531-0739.
- [5] PÉREZ-DE-EULATE, N.G.; ARANBURU-IZTUETA, A.; GONDRA, K.; VALLEJO, F.J. Influence of the fibre content, exposure time, and compaction pressure on the mechanical properties of ultraviolet-cured composites. *J. Compos. Sci.* 4 (2020) 30; doi:10.3390/jcs4010030.
- [6] TENA, I.; ESNAOLA, A.; SARRIONANDIA, M.; ULACIA, I.; TORRE, J.; AURREKOETXEA, J. Out of die ultraviolet cured pultrusion for automotive crash structures, *Composites: Part B* 79 (2015) 209–216.
- [7] SÁENZ-DOMÍNGUEZ, I.; TENA, I.; ESNAOLA, A.; SARRIONANDIA, M.; AURREKOETXEA, J. Design and characterisation of cellular composite structures for automotive crash boxes manufactured by out of die ultraviolet cured pultrusion, *Composites Part B* 160 (2019) 217–224.
- [8] TÜRK, D.A.; KUSSMAUL, R.; ZOGG, M.; KLAHN, C.; LEUTENECKER-TWELSIEK, B.; MEBOLDT, M. Composites part production with additive manufacturing technologies, *Procedia CIRP* 66 (2017) 306–311.
- [9] LIU W.; CHEN P. A simple procedure for the determination of the cohesive law in 4-ENF test with consideration of the friction and R-curve effect, *Engineering Fracture Mechanics* 220 (2019) 106651.
- [10] BURUAGA, L.; SAENZ-DOMINGUEZ, I.; BASKARAN, M.; ESNAOLA, A.; TENA, I.; AURREKOETXEA, J. Moldes fabricados en impresión 3D para el curado UV aplicado a Light-RTM. *Materiales Compuestos*, [S.l.], v. 4, n. 4, p. 138-142, oct. 2020. ISSN 2531-0739.