

M.E. Rodríguez^a, R. Lecouche^a, M.A. Bermúdez^a, M. Domingo^a^a EURECAT, Technological center of Catalonia, Av. Universitat Autònoma, 23, 08290 Cerdanyola del Vallès, Barcelona, Spain

Diseño y fabricación de moldes modulares para el desarrollo de estructuras en composite para trenes

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 22 de Abril 2022

En la versión revisada 29 de Abril 2022

Aceptado 2 de Mayo 2022

Accesible online 9 de Mayo 2022

Palabras clave:

(Debe introducir cinco palabras clave)

Fractura interlaminar

Fatiga

Impacto

El éxito del sistema ferroviario europeo requiere trenes de pasajeros rentables con alta capacidad y confiabilidad. El desarrollo de estos trenes de alta exigencia implica un esfuerzo concertado para mejorar una amplia gama de elementos. CARBODIN contribuye a este esfuerzo combinando el esfuerzo de investigación junto con el futuro CFM-IP1-01-2019 y los proyectos en curso CFM-IP1-01-2017 para fabricar piezas de carrocería, puertas y mejorar el diseño interior de los trenes de pasajeros.

CARBODIN mejora la fabricación de carrocerías explorando las posibilidades que ofrecen los materiales compuestos. Con este fin, CARBODIN aboga por un utillaje modular para fabricar una amplia gama de piezas de diverso tamaño, liderado por EURECAT. Además, el proceso propuesto combina diferentes técnicas de producción, conceptos de automatización, introducción de piezas compuestas co-curadas y co-adheridas y juntas e inserciones integradas de múltiples materiales. Además, el mantenimiento predictivo se refuerza probando nodos de sensores inteligentes. Los materiales compuestos también son la idea central para puertas rentables con LCC reducido. La creación de herramientas modulares combinadas con tecnología 3D está permitiendo la producción de puertas más ligeras con propiedades térmicas y acústicas mejoradas en la puerta y sus alrededores.

Design and manufacture of modular molds for the development of trains composite structures

ABSTRACT

Keywords:

(You should enter five keywords)

Nano graphite platelets

Cementitious composites

Electrical resistivity

Piezoresistivity

The success of the European rail system requires cost-efficient passenger trains with high capability and reliability. The development of these high demanding trains involves a concerted effort in improving a comprehensive range of elements. CARBODIN contributes to this effort by combining the research effort along with the future CFM- IP1-01-2019 and the ongoing CFM-IP1-01-2017 projects to manufacture car body shell parts, doors and to improve the interior design of passenger trains.

CARBODIN improves car body shell manufacture by exploring the possibilities offered by composite materials. To this end, CARBODIN advocates for a modular tooling to manufacture a wide range of parts of varying size, leaded by EURECAT. In addition, the proposed process combines different production techniques, automation concepts, introduction of co-cured and co-bonded composite parts and multi-material integrated joints and inserts. Besides, predictive maintenance is reinforced by testing intelligent sensor nodes. Composite materials are also the core idea for cost-efficient doors with reduced LCC. The creation of modular tooling combined with 3D technology is enabling the production of lighter doors with enhanced thermal and acoustic properties in the door and its vicinity.

1 Introducción

Los materiales compuestos de alta resistencia presentan importantes oportunidades para soluciones energéticamente eficientes con menor impacto ambiental y menores costes de vida útil para la infraestructura ferroviaria. Es innegable que se requieren soluciones de movilidad más sostenibles para abordar la escasez de recursos globales y el cambio climático. Los composites ya están desempeñando un papel cada vez más importante dentro de las industrias del transporte debido a su naturaleza liviana, durabilidad y baja huella ambiental.

Las principales ventajas del uso de composites reforzados con fibra en la infraestructura ferroviaria surgen de la alta relación resistencia-peso y rigidez-peso del material, en comparación con los materiales convencionales como el acero, lo que da como resultado estructuras ligeras. Además, los composites ofrecen una excelente resistencia a la corrosión y a la intemperie, lo que los hace adecuados para estructuras duraderas con un mantenimiento reducido. Además, existen desarrollos que permiten fabricar piezas de composite de manera rentable que cumplen con los estrictos estándares de fuego, humo y toxicidad para una amplia variedad de aplicaciones de infraestructura ferroviaria.

No obstante, uno de los problemas al que se enfrenta el sector ferroviario a la hora de introducir materiales compuestos es el cambio en los diseños de las piezas del tren que, por diferentes motivos, son modificadas periódicamente (estrategias de marketing, requisitos técnicos, nuevos avances en diseños, etc.). La mayoría de las piezas de composites se fabrican por procesos que necesitan un molde o un útil para su conformación. Estos moldes, debido a los requerimientos de proceso, geometrías de las piezas y tamaño de estas tiene un coste muy elevado y es difícil su amortización si tenemos en cuenta el número de piezas que se fabricarán.

Sin embargo, puede ser posible fabricar diferentes piezas con un mismo molde si las geometrías tienen suficientes similitudes, logrando importantes ahorros en la fabricación de las piezas.

En esta línea, se han llevado a cabo actividades de investigación y desarrollo para la fabricación de diferentes diseños de una pieza con un mismo molde, utilizando moldes modulares que incluyen bloques intercambiables y/o insertos. Entre otros estudios, se ha analizado el cambio de una sola zona del molde, para que la fabricación de una pieza se pueda hacer de forma sencilla y más económica cuando cambie su diseño. Además, se ha estudiado la fabricación de alguno de los insertos mediante impresión 3D, con el fin de agilizar la fabricación de los moldes y reducir costes.

El estudio se ha aplicado a 3 partes del tren: Carcasas de carrocería, puertas e interiores. La tecnología de fabricación escogido ha sido el moldeo por infusión, una técnica muy utilizada en el sector ferroviario ya que permite fabricar grandes estructuras de composite con alta calidad y coste competitivo.

2 Estudio de modularidad en la estructura de vagón de pasajeros

La sección representativa del vagón de pasajeros consta de 9 piezas diferentes; 5 de ellas pertenecen a la estructura del

vagón, 2 piezas corresponden a las puertas y 2 son parte del interior. La figura 1 muestra el diseño del demostrador completo.

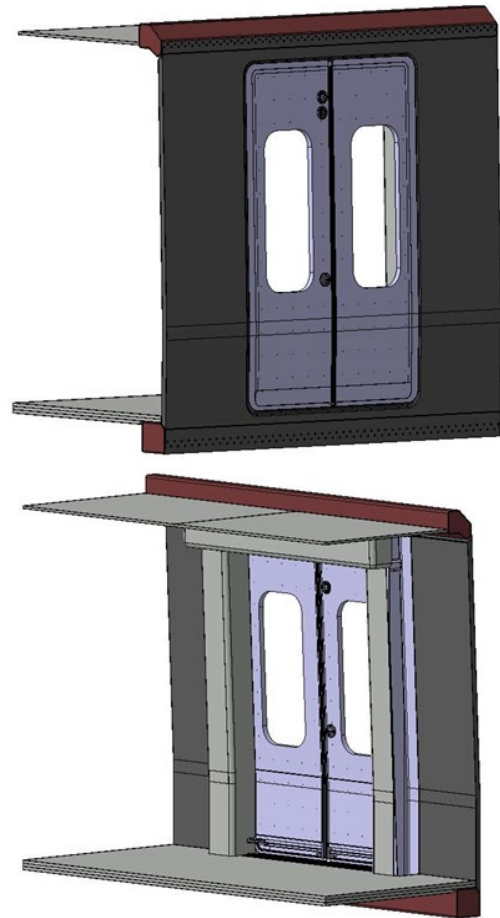


Figura 1. Geometría demostradora. Vista exterior de la sección representativa seleccionada

2.1 Diseño de moldes y utillajes

El demostrador escogido está compuesto por diferentes componentes. Por tanto, se han diseñado todas las piezas necesarias y suficientes para componer toda la estructura. A continuación, se han diseñado los moldes para poder fabricar las diferentes piezas. Los moldes "1", "2A", "2B", "3A" y "3B" fabricarán las piezas que constituyen la carrocería, los moldes "4A" y "4B" fabrican las piezas que constituyen las hojas de las puertas y, los moldes "5" y "6" fabricarán las piezas interiores del demostrador. En la tabla 1 se muestra el resumen de los moldes y piezas desarrolladas para demostrar la modularidad.



Tabla1. Relación de piezas de la geometría demostradora del vagón de tren.

Nº	Descripción	Geometría	Comentarios
BLOQUE 1. Estructura de vagón			
1	Pared lateral	Carcasa	Panel sándwich
2a	Suelo travesaño lateral	Perfil cerrado	1 molde, 2 piezas
2b	Techo travesaño lateral		
3a	Pilar puerta (izq.)	Perfil abierto (U o C)	1 molde, 4 piezas
3b	Pilar puerta (dcha)		
BLOQUE 2. Puertas			
4a	Puerta (izq)		1 molde, 2 piezas
4b	Puerta (dcha)		
BLOQUE 3. Interiores			
5	Panel interior del pilar de puerta (izq y dcha)		Objetivo 1 molde de perfil U par 2 piezas de perfil L
6	Panel superior interior	Pared fina 2-3 mm	

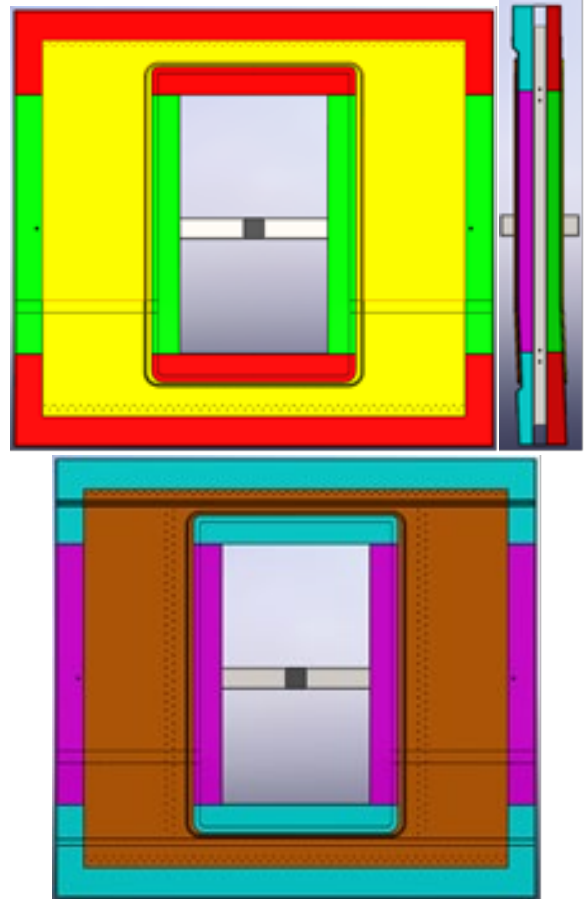
En los diseños de moldes se han considerado diferentes factores como; la estrategia de desmoldeo; la capacidad de drapeado de los tejidos de refuerzo; las uniones y ensamblaje; el número de ciclos de producción, el tipo de materias primas a utilizar y acabados superficiales (rugosidad)

- Estrategia de desmoldeo: Los moldes se han diseñado para facilitar la etapa de desmoldeo. Además, la propia estrategia de modularidad ayudará al desmoldeo ya que en las zonas donde la geometría es compleja y puede complicar el desmoldeo, se han agregado elementos removibles como parte de la estructura del molde.
- Capacidad de drapeado de los tejidos refuerzo: Se han eliminado o suavizado las aristas de los moldes y se han aumentado los radios de las áreas curvas en la medida de lo posible con el fin de mejorar la colocación de los tejidos y evitar zonas ricas en resina.
- Uniones y montaje de las diferentes piezas en el demostrador final: Todas las piezas han sido diseñadas considerando el montaje final del demostrador.
- Ciclos de producción: El concepto de modularidad se puede extrapolar a otros procesos más adecuados a una escala de producción en masa, como RTM o termocompresión. Por tanto, la modularidad de los útiles de fabricación es un factor clave para la reducir costes.
- Materiales de los moldes: Los diseños de moldes cubren la posibilidad de fabricar los moldes en varios materiales metálicos (aluminio o acero) o placas mecanizables (epoxi, poliuretano o similar) e incluso, composites, donde se introducen bloques mecanizados intercambiables. Los insertos intercambiables podrían fabricarse mediante mecanizado de placa o mediante tecnología 3D para una rápida reconfiguración y adaptación de la geometría,
- Materiales de las piezas: Los moldes se han diseñado para el proceso de infusión de resina con curado a temperatura

ambiente y, por lo tanto, los materiales utilizados en el estudio han sido placas mecanizables sin requerimientos de temperatura.

En el molde "1" pared lateral, se pueden observar tres partes diferenciadas para el desarrollo del prototipo final: skin "A", skin "B" y núcleo. Es decir, se ha diseñado un molde que permite fabricar las dos pieles y unir las con un núcleo

Para realizar el proceso de infusión al vacío, el molde tiene un área perimetral extra para la colocación bolsa de vacío.

**Figura 2.** Diseño pared lateral

Para el molde "1" pared lateral, el concepto de modularidad se ha aplicado a nivel de diseño. En esta línea, se ha diseñado una pared lateral más larga con algunos recortes de ventana adicionales, como se muestra la figura. Cambiando el cabezal interno, será posible utilizar el mismo portamoldes y fabricar una ventana en lugar de una puerta. Además, si cambia la geometría de la ventana, seguirá siendo posible utilizar el mismo soporte de molde que incluye un cabezal con la geometría deseada. Además, será posible hacer una extensión de los moldes y agregar un bloque adicional para los recortes de ventanas que pueden realizar paredes laterales más largas con posiciones de puertas o ventanas donde se desee.



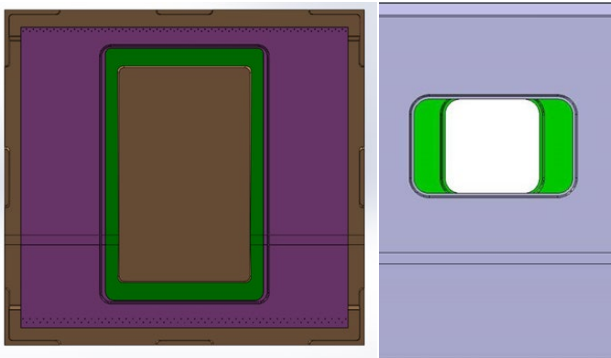


Figura 3. Pared lateral del demostrador: Diferentes recortes de ventana superpuestos que pueden fabricarse a partir del molde modular

Par la fabricación de las piezas “suelo del travesaño lateral y techo del travesaño lateral se ha diseñado un único molde modular que ha permitido fabricar las 2 geometrías. En la figura 4 se muestran las 2 geometrías de pieza de composite que se han fabricado con el molde modular.

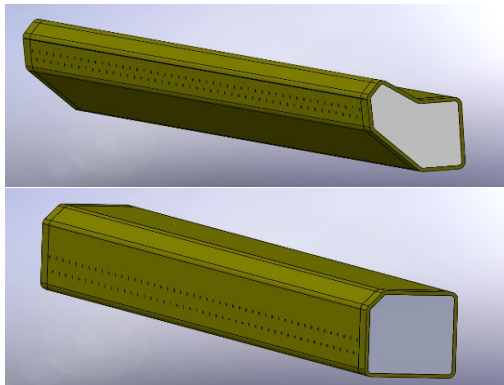


Figura 4. Diseño de las piezas del techo del travesaño lateral (izquierda) y del piso del travesaño lateral (derecha)

El molde para ambas piezas está compuesto de varias partes que, a pesar del gran tamaño del útil, son fácilmente intercambiables para poder realizar los trabajos de montaje e infusión de cada una de las piezas de manera ágil. Este diseño permite un gran ahorro en costes ya que se reduce en gran medida el material y el trabajo de mecanizado de los moldes. En la figura 5 se muestra el diseño del molde modular para las dos geometrías. Las partes modulares (intercambiables) se muestran en color oscuro, mientras que las claras representan la parte fija, común para ambas geometrías.

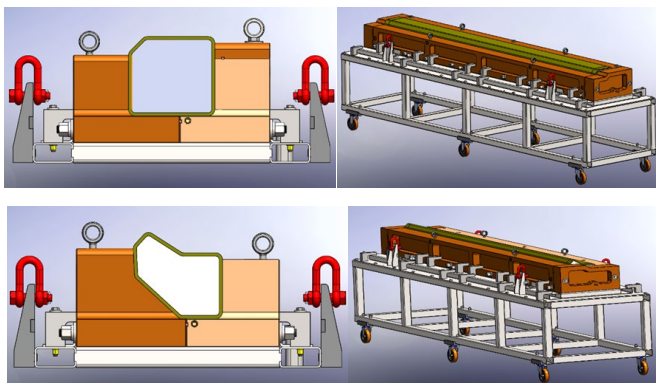


Figura 5. Diseño del molde modular en las 2 posiciones: Molde “2A” para suelo travesaño lateral y Molde “2B” para techo travesaño lateral.

Para la fabricación de los “pilares izquierda y derecha de la puerta”, se ha diseñado un molde modular que permite fabricar las 2 geometrías. En la figura 6 se muestra el esquema del diseño del molde y su modularidad para la fabricación de cada uno de los pilares de la puerta. En este caso, la modularidad del molde viene dada por el uso de una estructura principal que permite fabricar las 4 partes necesarias para componer el pilar de la puerta completo

Con la fabricación de perfiles en U simétricos mediante el ensamblaje del molde con el respectivo bloque de extensión del molde, se genera un perfil en L interior y otro exterior para cada lado de la puerta. Además, los perfiles interiores del pilar de la puerta obtienen sus modificaciones geométricas mediante el uso de un bloque de extensión modificado.

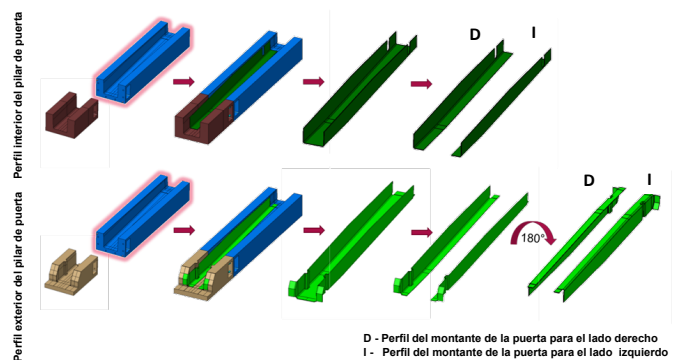


Figura 6. Diseño molde pilares izquierda y derecha. Esquema de insertos y estrategia de colocación.

En cuanto a los prototipos “puertas”, tanto la puerta izquierda como la derecha se fabricarán con el mismo porta moldes y cambiando los bloques internos que contienen las geometrías izquierda o derecha. El molde consta de:

- Un soporte para moldes.
- Un conjunto de insertos (macho y hembra) para la piel exterior y piel interior del panel sándwich que constituye la puerta derecha.
- Un conjunto de insertos (macho y hembra), para el revestimiento exterior y revestimiento interior de la puerta izquierda.

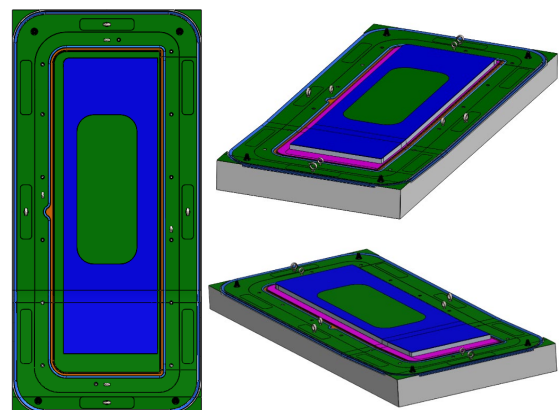


Figura 7. Diseño del molde modular para la fabricación de las puertas izquierda y derecha



Además, el portamoldes y los bloques internos incluyen elementos de manipulación extraíbles que permiten el manejo fácil y seguro del molde y el intercambio de los diferentes insertos.

Además, este concepto de molde permite actualizar los diseños de las puertas en trenes futuros de manera más económica, ya que parte del molde se podría mantener y sólo sería necesario cambiar insertos o detalles en función del nuevo diseño. Es decir, se reduce el coste en material, en mecanizado y se reducen los tiempos de desarrollo del nuevo producto.

3 Desarrollo de insertos de molde por impresión 3D

En paralelo, se ha explorado la introducción de insertos en los moldes fabricados por impresión 3D con el fin de agilizar la fabricación. Estos insertos pueden tener diferente tamaño en función de la geometría que se desea modificar.

La tecnología de fabricación aditiva seleccionada para fabricar los insertos del molde en impresión 3D ha sido Multi Jet Fusion (MJF) de Hewlett-Packard. En este proceso de impresión, la impresora deposita una capa de polvo en la cama de impresión. A continuación, un cabezal de inyección de tinta atraviesa el polvo y deposita sobre él un agente de fusión y un agente de acabado. Las principales limitaciones que presenta esta tecnología son las dimensiones máximas o volumen de las piezas que se pueden fabricar, ya que el volumen de construcción de la máquina MJF es de 380 x 285 x 380 mm, Además, debido a las distorsiones térmicas de las piezas grandes, solo se puede utilizar un 20% del volumen total (dependiendo de la geometría puede ser hasta un 30%).

Por este motivo, las actividades de impresión 3D dedicadas a la fabricación de los insertos de gran tamaño se han centrado en 3 aspectos:

- Estudio de las diferentes uniones entre las piezas insertadas y el portamoldes.
- Post-procesado de la superficie del molde para reducir la línea de división entre las piezas del inserto.
- Estudio de recubrimientos para la mejorar del acabado de la superficie del inserto impreso en 3D y mejora del desmoldeo.

3.1 Estudio entre las diferentes uniones entre insertos y portamoldes

Para el estudio, se ha escogido un molde "tipo" y se ha dividido en diferentes partes que se ajustan al volumen máximo de la impresora MJF. Se ha estudiado cómo y dónde realizar el corte para poder fabricarla en piezas en máquina MJF.

El objetivo principal ha sido dividir la geometría en secciones y no afectar el acabado de la superficie ni el rendimiento del molde. Las líneas de corte se han colocado en zonas estratégicas siguiendo la geometría del molde para mejorar la unión posterior y evitar aristas vivas, asegurando una buena impresión.

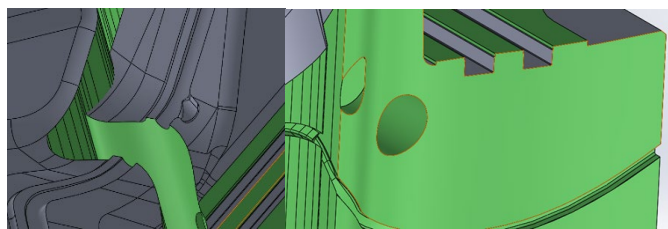


Figura 8. Detalle de la línea de división del inserto

Para unir diferentes piezas utilizando un material poroso como el PA12, es necesario insertar una "junta tórica", para evitar fugas de fluidos a través del molde que pudieran dañarlo. Por esta razón, se diseñó una ranura en las líneas de división. Además, se ha aumentado el grosor de pieza varios milímetros para poder hacer un mecanizado post-impresión y así asegurar la planaridad de las superficies de contacto.

La estrategia de unión se ha abordado por 2 líneas de estudio diferentes; "inserto-inserto" y "portamoldes-inserto".

En la unión "inserto-inserto", se han utilizado barras roscadas pasantes entre los insertos y el portamoldes, consiguiendo así, una buena fijación del conjunto.

Es importante señalar que, el tamaño del inserto es determinante cuando se utiliza la tecnología de impresión MJF debido, principalmente a la complejidad en la evacuación de calor durante su fabricación. Si no hay una correcta evacuación de calor, aparece un defecto denominado "piel de elefante" que consiste en que la pieza se contrae de manera desigual en las diferentes zonas y da como resultado superficies desiguales con una rugosidad pronunciada

Para evitar este fenómeno, se han diseñado insertos "pieles" reduciendo, así, la cantidad de masa mejorando la disipación de calor de manera importante. Posteriormente, estas "pieles" pueden ser rellenadas con resinas a medida de los requerimientos del molde.

En la unión "portamoldes-inserto", dependiendo de la dimensión del inserto, se han determinado diferentes dimensiones de tornillos según las dimensiones del inserto.

3.2 Post-procesado de la superficie del molde para reducir la línea de división entre las piezas del inserto.

Se ha estudiado el efecto sobre la rugosidad superficial que tiene la aplicación de diferentes selladores en piezas fabricadas por MJF. Para ello, se han escogido diferentes materiales sellantes comerciales con capacidad de unir PA12.

Se han evaluado diferentes aspectos de los resultados: facilidad de aplicación, tiempo de pulido (después de la aplicación) y calidad final. Con la ayuda de una matriz de decisiones y ponderados los diferentes aspectos considerados se ha seleccionado el mejor sellador.

Para el estudio, se ha fabricado muestra de prueba donde se han testado cada uno de los selladores escogidos. El prototipo simula las diferentes curvaturas que se pueden encontrar en el molde con unos bordes con superficie orgánica. El sellador se ha aplicado en las zonas de separación que se encuentran al



unir los moldes, posteriormente, se ha procedido al pulido con diferentes con papel de lija de diferente grano.

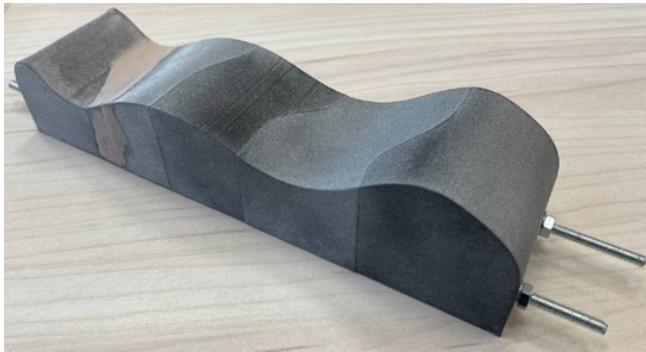


Figura 8. Muestra utilizada para el estudio de uniones con diferentes selladores.

El prototipo impreso en la tecnología MultiJet Fusion de HP presenta 4 áreas de unión denominadas A, B, C y D, donde se han aplicado las 4 masillas sellantes a estudio. Por lo tanto, los límites donde se ha aplicado la masilla son A-B, B-C, C-D y D-E.

Tabla2. Relación de masillas sellantes y tiempo de curado para cada sección estudiada

Sección	Masilla	Tiempo curado
A-B	PROLAB	16 h
B-C	Krafft Polyester fiberglass	30 min
C-D	Loctite 5699	10 min
D-E	Sika Easymax	20 min

Se ha estudiado el efecto sobre la rugosidad superficial que tiene la aplicación de diferentes selladores y masillas en piezas fabricadas por MJF. La experimentación de rugosidad de las piezas se realizó con el rugosímetro Mitutoyo SurfTest SV-2000 siguiendo los criterios marcados por la norma UNE-EN ISO 4288: 1997. Se utilizó la aguja con referencia 12AAB415.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla (el valor de referencia es la rugosidad de las piezas de PA12, sin masilla).

Tabla3. Rugosidad superficial para cada masilla sellante

	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Media	
	Ra1	Rq1	Ra2	Rq2	Ra3	Rq3	Ra media	Rq media
Ref.	9,54	11,92	6,61	8,18	7,83	9,78	8,00	9,96
A-B	3,08	4,06	3,62	4,75	3,30	4,20	3,34	4,33
B-C	4,76	6,78	1,39	1,79	2,45	3,17	2,87	3,92
C-D	18,38	21,67	15,15	19,95	15,57	19,28	16,37	20,30
D-E	4,22	5,52	5,91	8,92	5,07	6,25	5,07	6,90

La mejor rugosidad la presenta la sección unida con masilla Poliéster Krafft con fibra de vidrio. Sin embargo, presenta problemas de aplicación que dificulta el proceso de masillado. Por el contrario, el Loctite 5688 se descarta por completo ya que tiene muy malos resultados de rugosidad y el pulido de la pieza es dificultoso.

Por tanto, evaluando todos los resultados del estudio, se concluye que, la masilla Sika Easymax presenta mejor acabado superficial y el más fácil de aplicar. Además, solo necesita 20 minutos para el curado.

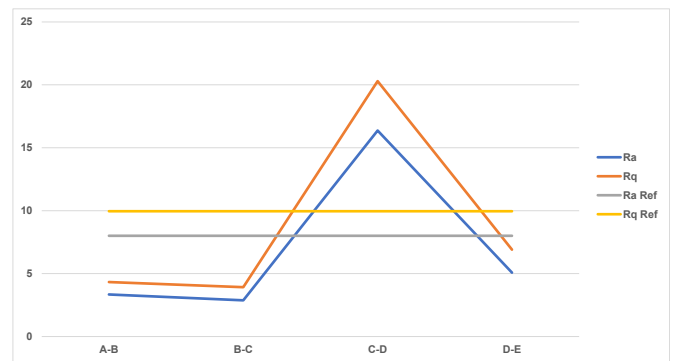


Figura 9. Comparativa de las diferentes rugosidades para cada masilla sellante

3.3 Estudio de recubrimientos para mejorar el acabado superficial del inserto impreso en 3D y mejora del desmoldeo

Se han estudiado diferentes recubrimientos para mejorar el acabado superficial de los insertos fabricados por impresión 3D. Las muestras de prueba han sido fabricadas con MJF y posteriormente, han sido tratadas con diferentes recubrimientos para mejorar el acabado de la superficie y ayudar al desmoldeo de la pieza de composite.

Todas las muestras han sido ensayadas utilizando un medidor de rugosidad para determinar el acabado de la superficie.

Se han escogido 4 resinas comerciales y para cada una de ellas se fabricaron dos probetas por impresión 3D, la primera con una sola capa y la segunda con dos capas de revestimiento. La siguiente tabla 4 muestra la relación de los ensayos realizados.

Tabla4. Rugosidad superficial para cada tipo de recubrimiento

	Resina	Capas	Ra	Rq
A	Plastik 70	1	7,2	8,7
B		2	6,8	8,2
C	RS Epoxy	1	5,5	7,0
D		2	6,6	8,2
E	Loctite 8021	1	11,3	11,8
F		2	9,3	11,3
G	Electrolube	1	5,9	7,3
H		2	4,5	5,8
I	Sin recubrimiento.		9,9	12,2
Ref.			0,8	1,0

Se puede observar que Loctite 8021 da como resultado una mayor rugosidad superficial igual a mineral que la pieza sin recubrimiento, por lo que se descarta por completo. La resina que presenta mejores resultados es Electrolube, seguida de RS Epoxy.



4 Conclusiones

El Proyecto CARBODIN "Car Body Shells, Doors and Interiors" ha permitido realizar un estudio exhaustivo en el diseño y fabricación de moldes de grandes estructuras en composites para el sector ferroviario.

Gracias a la investigación realizada a lo largo de todo el proyecto, se han podido validar la modularidad de los diferentes moldes utilizados para el desarrollo del prototipo final mediante infusión y RTM.

Cada diseño de molde ha sido pensado y desarrollado teniendo en cuenta tanto la geometría como la funcionalidad de los composites para la estructura del tren.

Por otro lado, el estudio de la fabricación de los insertos por impresión 3D permite, también, validar esta tecnología para su uso en moldes de gran tamaño para así mejorar su modularidad y su versatilidad.

Agradecimientos

El proyecto CARBODIN ha recibido financiación de Shift2Rail JU en el marco del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea (Grant Agreement n.º 881814).

