

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

DISEÑO, DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD PARA EL MOLDEO DE MATERIALES COMPUESTOS

Gorka Díez Barcenilla

2022

Directores

Ester Zuza Hernández

Koldo Gondra Zubieta

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a la directora de esta tesis doctoral, la Dra. Ester Zuza, cuya dedicación, orientación estratégica, motivación y apoyo en momentos difíciles, a lo largo de estos siete años, han guiado con tino el presente trabajo de investigación y la publicación de los artículos que de este trabajo dimanen.

Asimismo, agradezco al director industrial de esta tesis doctoral, el Dr. Joseba Koldo Gondra, cuyas aportaciones, ideas y consejos han supuesto un sustancial valor añadido al contenido del presente trabajo y una ayuda inestimable en momentos complicados.

En un trabajo de investigación siempre participan otras personas que gracias a su conocimiento en su área y colaboración desinteresada son parte fundamental del mismo y del proceso de aprendizaje personal. En este sentido, quiero agradecer a todos mis compañeros del área de materiales, y pidiendo disculpas de antemano si hubiera algún desafortunado descuido, y en especial a las siguientes personas: Ane, Beatriz, Borja, Carlos, Jone, José Luis, José Ramón, Juan Carlos, Laura, Lina, Nekane, Patricia, Rubén, Sandra, Santi y Txema.

Igualmente quiero expresar mi agradecimiento a los responsables de Gaiker que han colaborado y apoyado con recursos este proyecto de especialización, lo cual ha facilitado el desarrollo de éste.

También quiero agradecer al tutor de esta tesis y al responsable del programa de doctorado al que pertenezco el Dr. José Ramón Sarasua y el Dr. Jesus Maria Requies, respectivamente por la atención a mis consultas.

La realización de esta tesis doctoral no habría sido posible sin el apoyo vital de mi familia. A mis padres, que me han apoyado y ayudado en todo lo que ha estado en su mano desde el comienzo de esta aventura. A mi mujer por su paciencia, su gran apoyo moral pero también técnico, y, por eso, este trabajo es también suyo. Por último, a mis hijos por el tiempo que me han concedido en la última fase de este trabajo que me ha permitido finalizarlo.

RESUMEN

El objetivo de la presente Tesis es desarrollar una metodología de fabricación de moldes económicos y sostenibles para el proceso de moldeo por compresión en caliente de preimpregnados dirigido a la fabricación de series bajas o medias de piezas.

Actualmente, los moldes de acero que se emplean en esta tecnología de moldeo están orientados a la fabricación de lotes grandes de producción, debido al elevado coste del molde. En consecuencia, es económicamente inviable abordar una etapa inicial de desarrollo de producto en la que se fabrican y validan un número reducido de prototipos, debido al riesgo económico que ello supone.

La nueva metodología de fabricación de moldes desarrollada en el presente trabajo se adapta a la fabricación de series bajas de piezas, lo cual beneficia sustancialmente a la etapa de fabricación de prototipos, debido a que se posibilita la producción de prototipos a un coste razonable. Un ejemplo de lote reducido de fabricación es la reposición de dispositivos de cubrimiento de calzada.

Para desarrollar esta innovadora metodología, en la presente tesis se han estudiado numerosas técnicas de fabricación rápida de utillajes, y en concreto la técnica *epoxy tooling*. La investigación de esta técnica se ha centrado en identificar las mejoras que afectan al sistema productivo, como, por ejemplo, el incremento de prestaciones del molde, la reducción de costes en la fabricación, la sostenibilidad, y la implementación de tecnologías derivadas de la Industria 4.0.

A continuación, se han estudiado las características físicas, térmicas, mecánicas y económicas de diversos compuestos basados en resina epoxi cargados con residuos conductores térmicos, en concreto, viruta de acero procedente de procesos de mecanizado. Dichas propiedades se han comparado con las propiedades de compuestos homólogos cargados con polvo de aluminio comercial. Se ha comprobado, por ejemplo, que existe una sustancial ventaja competitiva en lo que respecta al coste por kilo de compuesto. Los moldes construidos mediante los compuestos de origen residual han sido capaces de moldear una serie corta de piezas, y, además, fácilmente desmoldables gracias a unas nuevas fundas de silicona implementadas en el molde.

Con objeto de reducir el consumo energético del proceso de moldeo, se propone la implementación, en el propio molde, de una barrera térmica que mejore su aislamiento, que

previamente es analizada mediante simulaciones térmicas por ordenador. Para ello, se analizan las propiedades físicas, térmicas, mecánicas y económicas de los compuestos de epoxi cargados con residuos de *sheet molding compound* (SMC) originarios de procesos de mecanizado, y se comparan con otros compuestos epoxídicos cargados con carbonato cálcico. Los moldes desarrollados presentan una menor disipación de calor al ambiente que los moldes sin barrera térmica y en consecuencia requieren un menor consumo de energía eléctrica.

Finalmente, se propone aplicar un ejemplo de producto (el dispositivo de cubrimiento) que podría ser fabricado mediante la técnica desarrollada en la presente tesis. Estos dispositivos se fabricarían para reponer aquellas rejillas de fundición que hayan sido sustraídas. Para ello, es necesario que las nuevas rejillas fabricadas en preimpregnado (no atractivas para los sustractores) encajen en la altura del marco vacío y cumplan con los requerimientos estructurales de la norma EN 124.

ABSTRACT

The objective of the present Thesis is to develop an economic and sustainable mold manufacturing method for hot-press compression molding of pre-impregnated pieces with a view to low or medium-volume serial manufacturing.

Currently, the steel molds that are employed in this molding technology are usually manufactured for high-volume batch production runs of molded pieces, due to the high cost of each mold. In consequence, it is economically inviable to assume an initial stage of product development in which a small number of prototypes are manufactured and validated, due to the economic risks that it might entail.

The new mold manufacturing method developed in the present work is adapted to the manufacture of low-volume batches, which is of substantial benefit at the prototype manufacturing stage for the production of prototypes at a reasonable cost. One example of a reduced manufacturing batch is the replacement of road gully grating.

In the present Thesis, numerous rapid tool manufacturing techniques are studied, and in particular the epoxy tooling technique. The investigation of this technique has been centered on identifying the improvements that affect the production system, such as, for example, enhancing mold performance, the reduction of manufacturing costs, sustainability, and the implementation of Industry 4.0 technologies.

Subsequently, the physical, thermal, mechanical, and economic characteristics of various epoxy-resin-based compounds containing thermally conductive waste are studied, in particular, steel shavings from machining processes. Those properties are compared with the properties of similar compounds containing commercial aluminum dust. It was, for example, confirmed that there is a substantial competitive advantage with respect to the cost per kilo of the compound. The molds formed with compounds from waste products could be used to mold a short series of pieces, and, in addition, were easily demolded, thanks to new demolding silicone rubbers fitted in the mold.

With the objective of reducing the energy consumption of the molding process, the implementation of a thermal barrier is proposed within the mold itself that improves its insulation. It was previously analyzed through computer-aided thermal simulations. To do so,

the physical, thermal, mechanical, and economic properties of the epoxy-compounds with Sheet Molding Compound (SMC) waste from machining processes are analyzed and compared with other epoxy compounds containing calcium carbonate. The molds under development presented lower heat dissipation into the atmosphere than the molds with no thermal barrier and, in consequence, it was required less consumption of electricity during routine molding of each piece.

Finally, it was proposed to apply an example product (the road gully grating) that could be manufactured with the technique developed in the present Thesis. These gratings could be manufactured to replace any cast-iron gratings that are stolen. To do so, the new pre-impregnated road gully gratings (of little value to thieves) must necessarily fit the empty gully-top frame and meet the structural requirements of Standard EN 124.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
2.1	INTRODUCCIÓN.....	6
2.2	LA SOSTENIBILIDAD EN LA FABRICACIÓN.....	7
2.2.1	Sustainable manufacturing y generación nula de residuos en la fabricación (ZWM) .	8
2.2.2	Residuos poliméricos	11
2.2.3	Residuos eléctricos y electrónicos.....	12
2.2.4	Otros tipos de residuos	14
2.2.5	Residuos derivados de procesos productivos.....	15
2.3	MOLDEO POR COMPRESIÓN DE PREIMPREGNADOS	16
2.3.1	Fundamentos técnicos	16
2.3.2	Materiales.....	18
2.3.3	Comparativa con otros procesos de fabricación de materiales compuestos.....	27
2.4	EJEMPLO DE APLICACIÓN: DISPOSITIVO DE CUBRIMIENTO.....	32
2.4.1	Problemática actual y solución planteada.....	32
2.4.2	El dispositivo de cubrimiento.....	35
2.4.3	Normativa vigente	36
2.4.4	Clases de dispositivos.....	37
2.4.5	Diseños, formas y tamaños de dispositivos.....	38
2.4.6	Desarrollos de los últimos años.....	39
2.5	EPOXY TOOLING	40
2.5.1	Rapid tooling	40
2.5.2	Implementación de la técnica epoxy tooling.....	42
2.5.3	Influencia de los canales de enfriamiento en el tiempo de ciclo	48
2.5.4	Efecto de la adición cargas en las propiedades de la resina epoxi.....	51
2.5.5	Reutilización de residuos para la construcción de moldes epoxi sostenibles	52
2.5.6	Industria 4.0	55

3	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	59
3.1	MATERIALES.....	59
3.1.1	Materias primas.....	59
3.1.2	Procesado de materiales compuestos.....	62
3.1.3	Análisis de costes y selección del compuesto.....	64
3.1.4	Materiales para la fabricación del molde.....	66
3.1.5	Materiales de moldeo.....	66
3.2	TÉCNICAS EXPERIMENTALES.....	67
3.2.1	Caracterización morfológica y analítica.....	67
3.2.2	Caracterización térmica de los compuestos.....	69
3.2.3	Caracterización mecánica de los compuestos.....	70
3.3	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MOLDES.....	74
3.3.1	Diseño y simulación de los moldes de compresión.....	74
3.3.2	Fabricación de los moldes de compresión.....	78
3.3.3	Pruebas de moldeo.....	82
3.3.4	Ejemplo de aplicación: dispositivo de cubrimiento.....	87
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	96
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	96
4.1.1	Caracterización morfológica y analítica.....	96
4.1.2	Caracterización térmica de los compuestos.....	102
4.1.3	Caracterización mecánica de los compuestos.....	104
4.1.4	Análisis de costes y selección del compuesto.....	108
4.2	DISEÑO DE MOLDES Y PRUEBAS DE MOLDEO.....	112
4.2.1	Simulaciones térmicas.....	112
4.2.2	Pruebas de moldeo preliminares.....	114
4.2.3	Pruebas de moldeo.....	115
4.2.4	Pruebas de moldeo monitorizadas.....	119
4.2.5	Ejemplo de aplicación: diseño del dispositivo de cubrimiento.....	120

5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	129
5.1	CONCLUSIONES.....	129
5.2	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....	130
6	BIBLIOGRAFÍA.....	133
7	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	156
8	PUBLICACIONES.....	159

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

Se advierte que la competitividad mundial futura dependa de la energía, un recurso básico que es esencial para el crecimiento económico, donde el consumo eléctrico de la fabricación industrial contribuye con aproximadamente un tercio del consumo mundial [1]. Se estima que el potencial de ahorro de energía de la industria manufacturera global puede llegar al 20 % [2]; por ello, en los últimos años se ha realizado una amplia investigación en mejorar la eficiencia energética de los procesos de fabricación [3,4]. Sin embargo, para lograr el ambicioso objetivo de minimizar los gases de efecto invernadero en un 80-95 % para 2050 con respecto a 1990 en Europa [5,6], también es necesario promover otras estrategias, como la eficiencia de los materiales, por ejemplo, mediante de la minimización de residuos.

Ello, junto a la necesidad de introducir rápidamente nuevos productos en el mercado y la tendencia hacia la personalización de productos, ha creado un nuevo panorama en la industria moderna: diseñar y producir pequeñas series de productos de forma económica y sostenible [7].

En la última década han ido emergiendo nuevas y mejoradas técnicas *rapid tooling* (RT) que tratan de dar respuesta a este nuevo escenario de producción. Sin embargo, queda cierto recorrido para que este conjunto de técnicas englobe aspectos sostenibles tanto en la propia fabricación de los utillajes como en el propio proceso de producción de productos.

El moldeo por compresión en caliente de compuestos de moldeo o SMC (*sheet molding compound*) es una tecnología de fabricación ampliamente utilizada en los sectores de automoción, construcción, transporte, etc. Su uso está cada vez más extendido debido a las propiedades mecánicas específicas y de aislamiento térmico de estos materiales plásticos reforzados. Esta técnica está dirigida a series de fabricación largas, debido a que se emplean moldes de acero tratados superficialmente. En general, son moldes de elevado coste y su adquisición, para el desarrollo de productos nuevos, supone un riesgo económico relevante.

Asimismo, esta tecnología de fabricación de productos de plástico reforzado presenta dos ventajas fundamentales frente a otras tecnologías dirigidas al ámbito de las series cortas o medias de producción: su elevada productividad y su reducida mano de obra. Sin embargo, no es rentable para la producción de lotes pequeños, ni sostenible, ya que la fabricación del molde tradicional genera una cantidad considerable de desechos de virutas de metal durante su fabricación [8,9].

Por ello, desarrollar una variante de la tecnología de moldeo por compresión en caliente que posea la capacidad de moldear productos mediante moldes de bajo coste, supone no solamente la creación de una tecnología competitiva e innovadora en el ámbito de las series cortas y medias de producción sino también, posibilitar la fabricación de prototipos sin necesidad de acometer una inversión cuantiosa en moldes de acero.

Si, además, esta tecnología emplea métodos sostenibles para fabricar moldes y se logran producir piezas requiriendo un menor consumo energético que la tecnología tradicional, la tecnología desarrollada no solamente sería una técnica competitiva, sino también daría respuesta a los retos actuales de sostenibilidad y eficiencia energética de la sociedad.

En el Capítulo 2 se revisan los conceptos generales en los que se basa este trabajo, tales como la sostenibilidad en la fabricación, el moldeo por compresión de preimpregnados, los dispositivos de cubrimiento (un potencial producto estructural de aplicación para esta nueva técnica de fabricación de moldes), las técnicas RT existentes en el mercado y las investigaciones recientes y los futuros trabajos de la técnica *epoxy tooling* (en la que se fundamenta la técnica desarrollada).

A continuación, en el Capítulo 3 se expone de manera detallada la metodología experimental realizada para la caracterización de los residuos, elaboración de los compuestos, así como la caracterización física, mecánica y térmica de los mismos. Asimismo, se muestra el procedimiento seguido para el diseño, las simulaciones térmicas y la fabricación de los moldes. Finalmente, se expone el método realizado para diseñar un producto estructural que podría producirse mediante la técnica de fabricación de moldes y moldeo desarrollada en la presente tesis.

En el Capítulo 4 se presentan y discuten los resultados obtenidos, estructurados principalmente en dos temáticas fundamentales, en primer lugar la caracterización de los materiales de partida y los compuestos desarrollados; en segundo lugar los resultados de las pruebas de moldeo (en tres escenarios diferentes) mediante los moldes desarrollados, así como los cálculos estructurales para el dimensionado de dos dispositivos de cubrimiento.

En el quinto capítulo del presente trabajo se exponen las conclusiones extraídas de la investigación realizada y los caminos futuros que se pueden trazar a partir de este trabajo.

Finalmente, en los capítulos 6, 7 y 8, se muestra la bibliografía empleada en esta tesis, el glosario utilizado en esta memoria y las publicaciones realizadas que dimanen de este trabajo, respectivamente.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una revisión del estado del arte relacionado con el trabajo de tesis doctoral, que se divide, fundamentalmente, en cuatro temáticas: la sostenibilidad en la fabricación, el moldeo por compresión, un producto estructural susceptible de ser fabricado por la nueva técnica, y el análisis de la técnica *epoxy tooling*.

En primer lugar, se revisa la sostenibilidad en la fabricación, que es un claro reto actual de la sociedad, por ello, en los últimos años han emergido diversas corrientes de fabricación: fabricación sostenible, *Zero Waste Manufacturing (ZWM)*, etc. Estas filosofías de fabricación están basadas en la economía circular para prolongar el ciclo de vida del producto y en el enfoque integral en las 6Rs: Reducir, Reutilizar, Reciclar, Recuperar, Rediseñar y Remanufacturar. Asimismo, se identifican los tipos de residuos más comunes hoy en día y las investigaciones realizadas sobre su tratamiento sostenible.

En segundo lugar, se estudia la tecnología de moldeo por compresión en caliente de preimpregnados, una técnica de transformación orientada a la fabricación de series largas de producción, que se basa en el moldeo y polimerización de compuestos de matriz termoestable reforzado con fibra, mediante la aplicación de presión y temperatura, lo que le confiere una serie de ventajas respecto de otras tecnologías de transformación de materiales compuestos. Se emplean moldes de acero tratados superficialmente, costosos, y que requieren de un tiempo considerable para su fabricación.

Ello, conlleva, posteriormente, a la revisión de la técnica *epoxy tooling*, una tecnología de fabricación rápida y económica de moldes para la producción de series cortas de fabricación. Las investigaciones actuales se centran en la mejora del sistema de producción, en el aumento del rendimiento, reducción de costes y sostenibilidad de los utillajes. Las investigaciones futuras están relacionadas con la sensorización y monitorización del utillaje, para un mayor control del sistema productivo.

Finalmente, se identifica un potencial producto estructural a producir por las nuevas técnicas y se estudia la normativa de producto, las clases, tamaños, etc. Así como los desarrollos realizados en los últimos años.

2.2 LA SOSTENIBILIDAD EN LA FABRICACIÓN

La sostenibilidad se ha convertido en un componente integral de la investigación para el siglo XXI. Los aspectos clave son: la rápida urbanización y el crecimiento de la población; la gran cantidad de desechos que se depositan en los vertederos cada año; la escasez mundial de recursos naturales como los combustibles fósiles, minerales y agua; la disminución de infraestructura; la aparición de emisiones de dióxido de carbono (CO₂); y el cambio climático [9-11].

El desarrollo sostenible se define como el desarrollo que satisface las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades [12]

En el contexto del desarrollo humano y la gestión medioambiental, el término sostenibilidad tiene contextos ideológicos, políticos, ecológicos y económicos y, en este marco, se considera más comúnmente como una derivación del término desarrollo sostenible [13].

La fabricación industrial es responsable de alrededor del 35 % del uso global de electricidad, más del 20 % de las emisiones de CO₂ y más de un cuarto de la extracción de recursos primarios. Junto con las industrias extractivas y la construcción, la manufactura representa actualmente el 23 % del empleo global. También representa hasta el 17 % de los daños a la salud relacionados con la contaminación del aire. Las estimaciones de los daños brutos de la contaminación del aire oscilan entre el 1 % y el 5 % del producto interno bruto mundial. Además, si la vida útil de todos los productos manufacturados se extendiera en un 10 %, el volumen de recursos extraídos podría reducirse en una cantidad similar [14].

Por suerte, el vínculo entre la fabricación y el entorno natural se está teniendo en cuenta gradualmente. El progreso, la rentabilidad, la productividad y la gestión ambiental ahora se consideran una necesidad por los fabricantes. Mejorar la gestión ambiental y la sostenibilidad, manteniendo la rentabilidad y la productividad, son considerados cada vez más como objetivos estratégicos en las empresas de producción [15].

En el pasado, los responsables de fabricación, en general, solo abordaban el aspecto económico de la producción, mientras que actualmente, han comenzado a abordar también el aspecto de la sostenibilidad ambiental.

Para ello, existen y son cada vez más comunes herramientas que son capaces de estimar para un producto dado, la huella de carbono, la evaluación [16] y la gestión [17] del ciclo de vida, el diseño para el medio ambiente y la administración/gestión del producto [18]. Se han publicado numerosos ejemplos empleando estas herramientas [19].

Se han investigado muchos aspectos de la sostenibilidad en el contexto de la fabricación, especialmente en los últimos años. Por ejemplo, Jayal et al. [20] analizaron el modelado y la optimización para la fabricación sostenible, considerando todos los niveles de producto, proceso y sistema. Nasr et al. [21] propusieron un marco para la producción sostenible, que también proporciona un enfoque estratégico para la remanufactura y que los autores identifican como un facilitador clave para la producción sostenible. Shuaib et al. [22] describieron enfoques y metodologías para diseñar cadenas de suministro sostenibles y una evaluación de su desempeño, al igual que los enfoques novedosos para la logística inversa y las cadenas de suministro de circuito cerrado [23-24].

Para actuar de forma sostenible, una empresa debe comprender cómo impacta la sostenibilidad, y esto requiere el uso de indicadores de sostenibilidad, de modo que se pueda medir el progreso hacia el logro de la sostenibilidad.

En este sentido, se han realizado esfuerzos para integrar dichas medidas de sostenibilidad en las prácticas de toma de decisiones en la industria. Por ejemplo, Parris y Kates [25] analizaron numerosos indicadores de sostenibilidad identificando hasta 255 indicadores. Además, Stokes [26] sugiere monetizar la sostenibilidad, mediante la aplicación del método *triple bottom line* en todo el entorno del sistema de fabricación.

2.2.1 *Sustainable manufacturing y generación nula de residuos en la fabricación (ZWM)*

La fabricación respetuosa con el medio ambiente implica un diseño ecológico de productos, el uso de materias primas ecológicas, el embalaje ecológico, la distribución y la reutilización después de la vida útil del producto. Además, disminuye el agotamiento de los recursos naturales y disminuye los desechos [27].

El concepto de producción sostenible surgió en la conferencia de las Naciones Unidas sobre medio ambiente y desarrollo en 1992 y se concluyó que la principal fuente de degradación ambiental son los patrones de producción y consumo insostenibles [28].

Desde entonces hasta la fecha se han realizado numerosos estudios de fabricación con una perspectiva sostenible, por ejemplo, Jayal y Balaji [29] propusieron un enfoque de fabricación sostenible para minimizar el uso de energía, material y maximizar la vida útil de la pieza.

La fabricación sostenible o *sustainable manufacturing* se basa en reducir piezas, racionalizar materiales, reutilizar componentes. Cubre una serie de aspectos de la fabricación, incluidas las "6R", es decir, reducir, reutilizar, reciclar, recuperar, rediseñar y refabricar, tal y como se muestra en la Figura 2.1 [30,31].

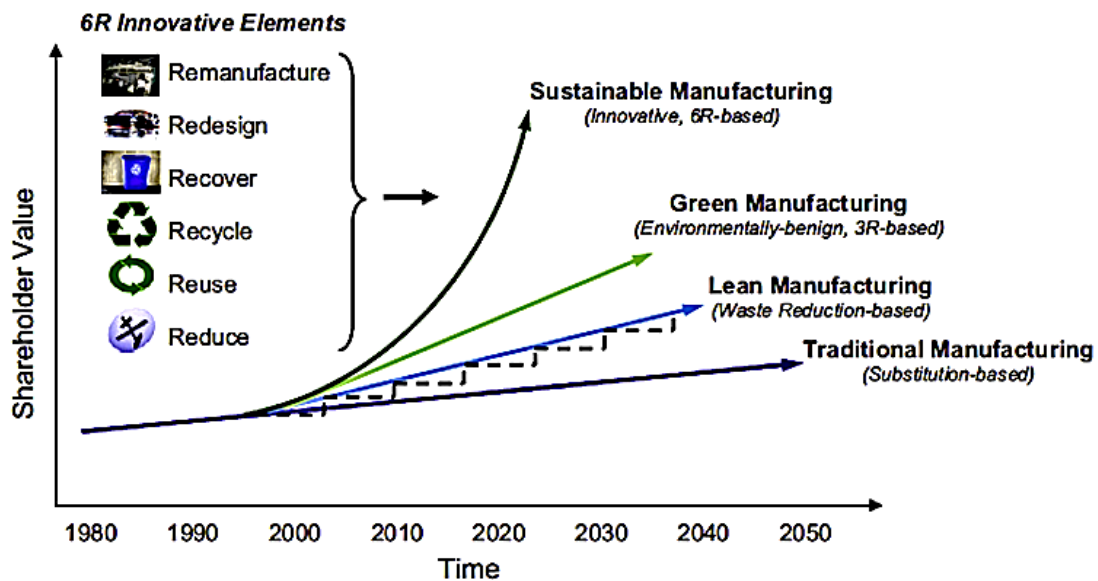


Figura 2.1 Filosofías de fabricación [30].

Otras sistemáticas menos sostenibles como el *Lean manufacturing* tiene por objetivo reducir el inventario, el tiempo de comercialización, el espacio de fabricación, etc, para ser altamente competitivo a la demanda de los clientes y producir productos de calidad de la manera más eficiente y económica posible. En este sentido, emplea herramientas como: *kaizen*, *one piece flow* o flujo de una pieza, *cellular manufacturing*, *synchronous manufacturing*, *pokayoke*, etc. [32].

El desarrollo sostenible se ha convertido en una parte importante que integra aspectos económicos, ambientales y sociales. De hecho, numerosos departamentos de comercio de diversos países han identificado recientemente la fabricación sostenible como uno de sus objetivos prioritarios [33].

Otro problema fundamental, está relacionado con que muchos productos no pueden recuperarse o reutilizarse, y, por lo tanto, contribuyen a la producción de residuos. Controlar los desechos es en sí mismo un gran desafío para los responsables en la toma de decisiones y en la

mayoría de las ocasiones, deben elegir soluciones ineficientes y contaminantes para el medio ambiente, como los vertederos [34].

Sin embargo, cada vez es más complicado encontrar vertederos adecuados que estén convenientemente ubicados y hay un gran costo involucrado en proporcionar las instalaciones necesarias a dichos vertederos para que sean medioambientalmente responsables [35].

En este sentido, la tasa de generación de residuos es muy elevada y parece que muy pronto va a ser inmanejable ubicarlos en vertederos apropiados. Según un informe realizado en 2009, se conoció que Malasia, EE.UU., Europa, Singapur, Vietnam, Tailandia, Camboya, Myanmar y Brunei produjeron 0,81 kg/cap/día [36], 2,2 kg/cap/día, 1,5 kg/cap/día, 1,1 kg/cap/día [37], 0,61 kg/cap/día, 64 kg/cap/día [38], 52 kg/cap/día, 0 kg/cap/día, 0,45 kg/cap/día y 0,66 kg/cap/día [39], respectivamente.

Hasta ahora, el ZWM es un término filosófico que alienta a los sistemas de fabricación a producir piezas sin contribuir al desperdicio. Seguir esta corriente filosófica resulta importante, ya que, a medida que aumentan los costos de materiales, energía y gestión de desechos, las mejoras de producción desde un punto de vista de eficiencia ambiental tendrán cada vez un mayor beneficio para las empresas.

En este sentido, el flujo de material sostenible está influenciado por muchos factores tal y como se advierte en la Figura 2.2. De modo que, la fabricación que logre un flujo sostenible habrá conseguido superar un reto, ya que, la tendencia hacia los procesos de fabricación convencionales es uno de los principales obstáculos existentes [40].

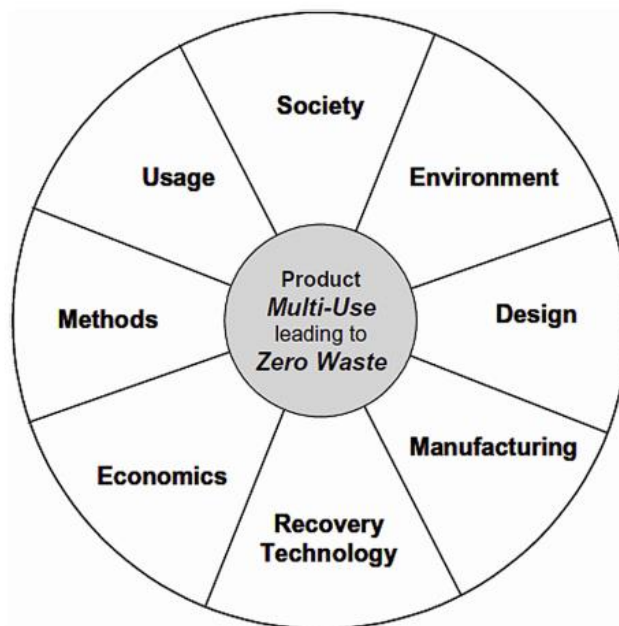


Figura 2.2 Factores que influyen en un flujo sostenible [40].

2.2.2 Residuos poliméricos

El reciclaje de polímeros es una forma de reducir los problemas causados por la acumulación de desechos poliméricos generados, principalmente por envases y construcción [41].

Los plásticos se encuentran en todas las principales categorías de residuos sólidos, incluidos los envases de plástico, tales como: sacos, refrescos, leche, bolsas y envases de agua [42,43]. En los bienes duraderos, los plásticos se encuentran en electrodomésticos, muebles, carcasas de baterías y otros productos.

Estudios recientes destacaron que, en el Reino Unido, los desechos plásticos constituyen el 7 % de los desechos [44]. El envase representa el 37,2% de todos los plásticos consumidos en Europa y el 35 % en todo el mundo [45].

Las opciones disponibles para tratar los desechos plásticos son: reutilización, re-extrusión (proceso primario), reciclaje mecánico (proceso secundario), reciclaje químico (proceso terciario) y recuperación de energía (proceso cuaternario) [46], tal y como se observa en la Figura 2.3.

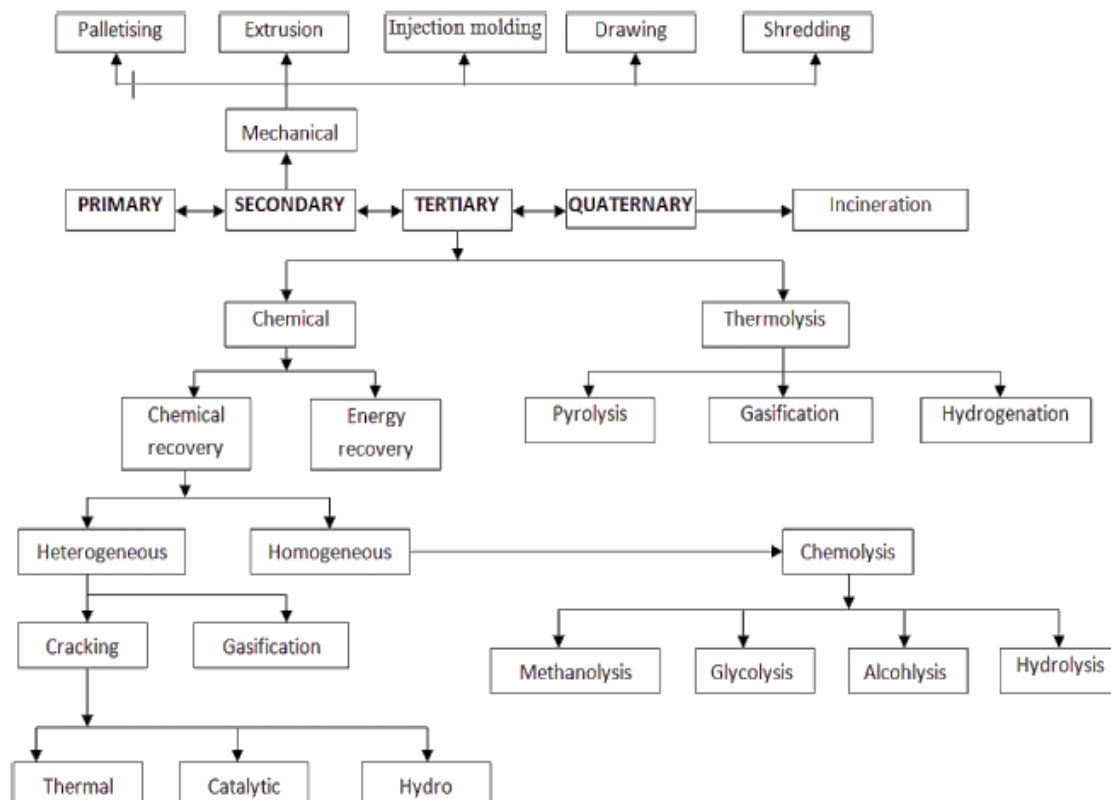


Figura 2.3 Método para reciclar desechos plásticos [46].

Actualmente, la mayoría de los desechos plásticos se reciclan con la ayuda de la técnica de re-extrusión. Particularmente en el Reino Unido, a principios de 2000, se generaron alrededor de 250.000 toneladas de desechos plásticos de los cuales el 95 % recicló mediante el mencionado proceso primario [47].

En las últimas dos décadas, se ha realizado una gran cantidad de trabajo en el campo del reciclaje de polímeros. Algunas de las investigaciones realizadas se muestran en la siguiente Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Publicaciones relacionadas con el reciclado de residuos plásticos.

Ref. y año	Material reciclado	Metodología usada	Investigaciones
[48] 2005	HDPE, PVC y PP	Mezclado en el cemento para hormigones	Térmico y energía
[49] 2007	Plásticos triturados	Mezclado en el cemento para hormigones	Resistencia mecánica
[50] 2007	HDPE y fibras naturales	Moldeo por compresión	Propiedades mecánicas
[51] 2009	ABS de alta y baja viscosidad	Moldeo por inyección	Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas
[52] 2010	ABS	Moldeo por extrusión e inyección	Propiedades mecánicas, térmicas y reológicas
[53] 2011	Polipropileno	Moldeo por inyección	Estructura química, viscosidad del fundido, propiedades de resistencia mecánica y a la fractura
[54] 2015	HDPE	Mezclado en el cemento para hormigones	Resistencia mecánica
[55] 2016	HDPE, 90-HDPE+10-Fe (polvo), LDPE and 94-LDPE+6-Fe (polvo)	Moldeo por extrusión	Propiedades mecánicas y metalúrgicas (porosidad, dureza, resistencia mecánica, etc)
[56] 2016	Residuo de Nylon-6	Moldeo por extrusión	Propiedades reológicas

2.2.3 Residuos eléctricos y electrónicos

Al igual que otros desechos peligrosos, el problema de los desechos electrónicos se ha convertido en una preocupación no sólo inmediata sino también a largo plazo, ya que, su acumulación y reciclaje no regulados, pueden conducir a problemas ambientales importantes y a poner en peligro la salud humana [57].

Los desechos electrónicos consisten en todos aquellos desechos de aparatos electrónicos y eléctricos que han llegado al final de su vida útil o ya no son aptos para su uso y están destinados a su recuperación, reciclaje o eliminación.

El hierro y el acero constituyen aproximadamente el 50 % de estos desechos, seguidos de los plásticos, metales no ferrosos y otros materiales. Los metales no ferrosos consisten en metales como cobre, aluminio y metales preciosos como plata, oro, platino, paladio, etc [58].

Los métodos mecánicos e hidrometalúrgicos son los métodos tradicionales para el reciclaje de placas de circuito impreso. Muchos investigadores han utilizado diversos métodos mecánicos para separar metales y no metales de dichos componentes, tales como: trituración múltiple, molienda, separación electrostática, separación por gravedad, separación por densidad y separación magnética [59]. Brandl et al. [60] muestran un diagrama de flujo (Figura 2.4) que representa el tratamiento de residuos electrónicos.

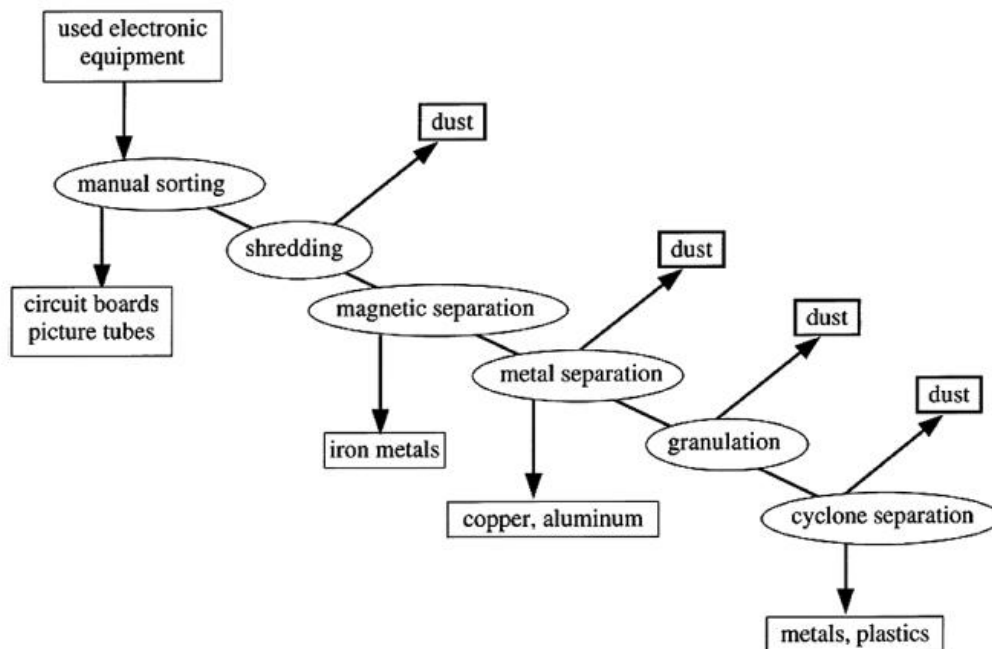


Figura 2.4 Diagrama de flujo para el tratamiento de los residuos electrónicos [60].

En este campo también se han realizado numerosas investigaciones. Por ejemplo, Zhou y Qiu [61] aplicaron un nuevo proceso de separación centrífuga y pirólisis a vacío, para la recuperación de los materiales de soldadura de las placas de circuitos impresos desperdiciados. Alagusankareswari et al. [62] utilizaron desechos electrónicos no biodegradables en hormigón y estudiaron las propiedades mecánicas del material.

Actualmente, la calidad de la tierra de los vertederos está disminuyendo debido a los desechos electrónicos [63]. Spalvins y et al. [64] concluyeron que es poco probable que la eliminación de los desechos electrónicos en los vertederos produzca concentraciones de lixiviados de plomo

preocupantes desde un punto de vista regulatorio. Dagan y et al. [65] demostraron que el cóctel químico producido por numerosos productos electrónicos que se filtra por la tierra y acaba en los ríos, es tóxico para los organismos acuáticos.

Muchos contaminantes procedentes de los desechos electrónicos se propagan al aire a través del polvo. Esta es una vía de exposición importante para los humanos a través de la ingestión, la inhalación y la absorción por la piel [66]. La contaminación del aire con dioxinas ha resultado situarse en niveles de exposición humana de 15 a 56 veces mayores que las que recomienda la OMS [67].

2.2.4 Otros tipos de residuos

Además de los desechos plásticos y electrónicos, existen otros tipos de desechos, tales como: papel, neumáticos, vidrio, cenizas, compuestos, cerámica, etc., Éstos, como es lógico, también contribuyen a la devastación de los recursos, la energía, la economía y el medio ambiente. En la siguiente Tabla 2.2, se muestran ejemplos de las investigaciones realizadas en torno al reciclaje de estos residuos:

Tabla 2.2 Publicaciones relacionadas con el reciclado de residuos de mecanizado de chatarra, neumáticos, vidrio, desechos de cerámica, etc.

Ref. y año	Materia reciclada	Metodología usada	Investigaciones
[68] 2000	Residuos de baldosas de cerámica	Mezclado en cementos	Densidad, tamaño de partícula, resistencia, etc.
[69] 2001	Fibra de acero	Mezclado en hormigones reforzados	Tests de permeabilidad
[70] 2004	Residuos de neumáticos	Asfalto aglomerante de piedra	Propiedades mecánicas
[71] 2003	Tratamiento de residuos de cuero con cromo	Operaciones de post-curtido del cuero	Comparación de hidrólisis alcalinas y enzimáticas
[72] 2006	Residuos de neumáticos	Mezclado en hormigones cauchutados	Propiedades mecánicas
[73] 2009	Residuos de vidrio	Mezclado en hormigones	Resistencia mecánica
[74] 2011	Residuos de acero	Mezclado en hormigones reforzados	Resistencia a compresión y test de procesado
[75] 2012	Fibras de acero	Mezclado en hormigones	Propiedades mecánicas
[76] 2015	Escoria de acero y cenizas	Mezclado en hormigones	Análisis de grietas mediante ultrasonidos
[77] 2016	Restos de neumáticos	Mezclado en hormigones	Propiedades mecánicas
[78] 2016	Productos cerámicos con calamina	Procesado específico	Efectos de la temperatura de cocción en las propiedades mecánicas y físicas

2.2.5 Residuos derivados de procesos productivos

2.2.5.1 Mecanización de acero

Los residuos de mecanizado de acero pueden provenir de distintas máquinas-herramientas, fresadora, torno, sierra, etc. Además, en función de las condiciones de mecanizado el tamaño de viruta puede ser diferente.

Por un lado, Vijayakumar et al. [79] (Figura 2.5) utilizaron virutas de procesos de gran desbaste (procedentes del torno y fresadora) en el hormigón reforzado para la industria de la construcción. Asimismo, Shukla [80] determinó la resistencia del hormigón cuando se mezcla con estas virutas.

Por otro lado, la microviruta de acero o *Grinding Steel Swarf* (GSS), es un tipo de residuo metálico minúsculo que se obtiene, entre otros, de los procesos de mecanizado de acero de alta velocidad, siendo esta tipología de viruta, complicada de tratar en los sistemas de reciclaje. Además, los altos costes de funcionamiento y la demanda de energía de las técnicas de reciclaje las hacen económicamente viables para reciclar virutas metálicas con altos precios de mercado, como, por ejemplo, aluminio (1.600 \$/Ton), cobre (2.100 \$/Ton), latón (1.500 \$/Ton) y acero inoxidable (640 \$/Ton), mientras que el hierro fundido y las virutas de acero (20 \$/Ton y 90 \$/Ton, respectivamente) son menos atractivos para reciclar [81].

Para gestionar estos residuos (por ejemplo, cada día se descargan 10 toneladas de GSS en una fábrica de rodamientos [82]), Shukla [80] y Seetharam et al [83] reutilizaron estos residuos y los agregaron al hormigón en diferentes porcentajes en peso. Asimismo, Takagi et al. [84] valorizaron el GSS al hacer un calentador corporal en lugar de usar polvo de hierro comercial.



Figura 2.5 Virutas de torno [79].

2.2.5.2 Mecanización de materiales compuestos

El polvo de SMC es otro residuo común en las fábricas de mecanizado debido al aumento de la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio o *glass fibre reinforced plastics* (GFRP), que alcanzó los 1069 millones de toneladas en 2015 [85]. En consecuencia, grandes cantidades de recortes y residuos de mecanizado (que se estima representan entre el 5 % y el 40 % del volumen total de producción de GFRP [86]) se gestionaban tradicionalmente mediante vertido controlado o incineración [87].

Sin embargo, legislaciones recientes más estrictas han limitado la cantidad de material orgánico que se permite arrojar a vertederos o incinerar. Así pues, hoy en día el vertido controlado se destaca como la opción menos preferida según la jerarquía de residuos, donde el reciclaje mecánico es el medio predilecto [86].

Los residuos de GFRP reciclados mecánicamente se han incorporado en muchos productos, como el SMC y BMC (*Bulk Moulding Compound*), hormigón, hormigón polimérico, etc. [88,89]. Sin embargo, en ocasiones este reciclado no afecta positivamente a algunas propiedades del compuesto, o los costes del propio reciclado mecánico superan el valor de mercado del producto virgen competidor, el carbonato de calcio, siendo ésta una de las principales barreras identificadas [90].

2.3 MOLDEO POR COMPRESIÓN DE PREIMPREGNADOS

2.3.1 Fundamentos técnicos

El moldeo por compresión es una de las técnicas de fabricación de materiales más antiguas. El proceso básico consiste en calentar una resina termoestable, bajo presión severa, dentro de una cavidad cerrada del molde hasta que la resina se cure a través de una reacción química de curado. Bajo presión, la resina fluye, tomando la forma de la cavidad del molde, y luego se endurece para obtener el producto deseado. Tras ello, la pieza se retira del molde y el ciclo se completa, aunque la reacción de curado continúa mientras se enfría a las condiciones ambientales [91] (Figura 2.6).

Las piezas moldeadas por compresión se fabrican, en general, mediante un compuesto de moldeo formado por refuerzo de fibra corta impregnadas en una resina termoestable, principalmente de resina poliéster insaturada o viniléster [92] denominado SMC o BMC para aplicaciones no estructurales o semiestructurales. Las principales ventajas de este proceso y

material son el escaso desperdicio de material, su potencial de automatización y su capacidad para moldear piezas relativamente grandes y de relativa complejidad geométrica [93].

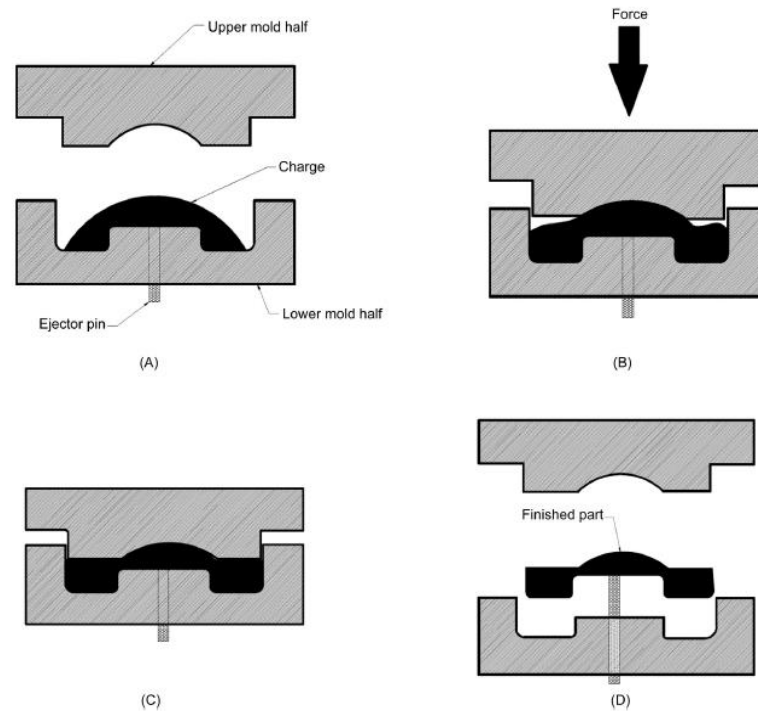


Figura 2.6 El proceso de moldeo por compresión descrito simplificado en cuatro pasos. (A) Cargado del compuesto en el molde. (B) Compactación del compuesto en molde caliente. (C) Curado de la pieza dentro de la cavidad del molde. (D) Expulsión de pieza [91].

En general, el moldeo por compresión de SMC y BMC es una de las tecnologías de fabricación más extendidas de entre los procesos de transformación de compuestos termoestables reforzados con fibra, y los productos fabricados con esta técnica se aplican en la industria eléctrica, automotriz y de transporte. Esta tecnología es rentable, debido a que, se obtienen tiempos de ciclo de proceso cortos en comparación con otras tecnologías de fabricación de compuestos termoestables reforzados con fibra [94].

Para fabricar piezas estructurales, se prefieren compuestos con refuerzo de fibra continua, como, por ejemplo, los denominados *High Performance Compound* (HPC) formados principalmente por resina poliéster insaturada [95], u otros preimpregnados compuestos de resina de elevadas prestaciones: epoxi, éster cianato, poliimida y bismaleimida [96]. Éstos presentan un alto rendimiento mecánico, logrado mediante una mayor fracción en volumen de fibra y la naturaleza continua de las fibras [97-99].

Los preimpregnados fabricados con matrices de altas prestaciones, exhiben excelentes propiedades mecánicas pero una baja productividad, ya que, se utiliza, principalmente, en la tecnología de fabricación de bolsa de vacío en autoclave. Por el contrario, los compuestos SMC, BMC, HPC, etc, presentan una alta productividad, ya que, utiliza un proceso más automatizado y en general, exhiben propiedades mecánicas inferiores [100-102].

2.3.2 Materiales

Los preimpregnados son estructuras reforzadas con fibra e impregnadas con resinas reactivas, listas para ser utilizadas, a las cuales se les ralentiza el proceso de reticulación almacenándolas a bajas temperaturas. La impregnación de las fibras se realiza mediante máquinas impregnadoras que aseguran unos porcentajes de fibra-resina muy elevados y precisos, mezclas muy homogéneas y una excelente uniformidad del impregnado [103].

Por un lado, en función de la matriz utilizada existen diversos métodos de elaboración del preimpregnado. Las resinas que, en general, se emplean son las resinas poliéster, viniléster y epoxi. Por el otro lado, se emplean diferentes formatos de fibra, *mat*, *roving* cortado, tejidos bidireccionales, unidireccionales, biaxiales y multidireccionales, etc. La naturaleza de las fibras más empleadas son vidrio, carbono y aramida [92,95,96].

Una vez impregnados los refuerzos, se deja avanzar la reticulación de la resina, de manera que aumenta su viscosidad, y se obtiene un material intermedio. Finalmente, se reducen la temperatura del compuesto fabricado, a efecto de retardar el ciclo de curado de la resina catalizada [103].

2.3.2.1 Matrices termoestables

Los polímeros termoestables, son líquidos a temperatura ambiente y necesitan de un curado para alcanzar el estado sólido [104]. La reacción irreversible de curado se puede realizar mediante calentamiento, siendo ésta la forma más habitual, aunque para ciertos sistemas de resinas, también es posible mediante diferentes tipos de radiación como la ultravioleta, haz de electrones, rayos gamma o microondas [105].

La matriz en el material compuesto reforzado con fibras cumple las siguientes funciones:

- Fijar las fibras en el ordenamiento geométrico deseado.
- Transmitir los esfuerzos a las fibras
- Mantener separadas las fibras evitando la abrasión entre ellas.

- Proteger a las fibras de los agentes externos, como por ejemplo de la humedad o del ataque químico.

En las resinas termoestables podemos diferenciar, por un lado, las que endurecen por copolimerización de radicales, como, por ejemplo, las resinas de poliéster insaturado y viniléster, o por el otro, las resinas que polimerizan por reacciones de condensación y adición entre sus grupos funcionales, como las resinas epoxídicas, fenólicas, bismaleimida, poliimidas etc. Estas últimas van a presentar mejores características térmicas y mecánicas que las endurecidas por radicales [104].

En la Tabla 2.3, se clasifican las matrices termoestables en función de la temperatura de servicio.

Tabla 2.3 Resinas termoestables clasificadas en función de la temperatura de utilización [106].

Bajas Temperaturas	Medias Temperaturas	Medias-Altas Temperaturas	Altas Temperaturas
Poliéster	Viniléster Epoxi	Fenólica	Bismaleimida Poliimida Esteres cianato Polieteramida

En la Tabla 2.4, se muestran ciertas propiedades mecánicas y térmicas de las matrices termoestables más empleadas.

Tabla 2.4 Resinas termoestables: propiedades mecánicas y coeficiente de expansión térmico [107].

Material	Resistencia específica	Resistencia tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Coef. expansión ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Poliéster	1.28	45-90	2.5-4.0	100-110
Viniléster	1.07	90	4.0	80
Epoxi	1.03	90-110	3.5	45-65

Las resinas más utilizadas en materiales compuestos de matriz termoestable son el poliéster y la viniléster. Se utilizan en aplicaciones industriales, de transporte y en productos comerciales [108]. Entre ellas destacan los sistemas de conducción de fluidos en plantas químicas, tanques de almacenamiento y reactores [109]; aplicaciones en infraestructuras en ingeniería civil,

cabinas de camiones y sistemas para el transporte de mercancías; bañeras y duchas; embellecedores y puertas de automóvil [107].

2.3.2.1.1 Resina poliéster

El poliéster insaturado es un polímero muy versátil, que permite obtener compuestos con buenas propiedades a precios relativamente bajos. Habitualmente se utilizan cuando se necesita un equilibrio entre las propiedades mecánicas y la resistencia química a temperaturas similares a ambiente [110].

Algunos puntos débiles de estas resinas son: la contracción en el curado, la susceptibilidad a los medios químicos especialmente a los medios alcalinos y la absorción de agua por parte de la resina [111]. También presentan una baja temperatura de transición vítrea. Esta es una de las resinas termoestables de mayor consumo en la fabricación de compuestos reforzados con fibra de vidrio [112].

La formulación de los poliésteres es muy variada, lo que permite obtener poliésteres con propiedades diferentes, de forma que, se ajusten a las necesidades específicas. La siguiente Tabla 2.5, resume los principales tipos de resinas de poliéster.

Tabla 2.5 Tipos de resinas de poliéster, componentes base y aplicaciones [107].

Tipos	Ác. o Anhidrido insaturado	Ác. o Anhidrido saturado	Glicol	Monómero	Aplicaciones
Ortoftálica	Anh. Maléico	Anh. Ftálico	Propilenglicol	Estireno	Barcos, estratificados industriales, placas onduladas y planas
Isoftálica	Anh. Maléico	Anh. Isoftálico	Propilenglicol Dietilenglicol	Estireno	Gel coats, depósitos, Ing. Química
Tereftálica	Anh. Maléico	Anh. Tereftálico	Propilenglicol	Estireno	Resistencia química mejorada
Resina del Ác. Tetracloroftálico	Anh. Maléico	Anh. Tetracloroftálico	Etilenglicol	Estireno	Comportamiento al fuego mejorado
Bisfénolica	Anh. Fumárico	Anh. Ftálico	Bisfenol A	Estireno	Aplicaciones anticorrosión

Para realizar el curado del poliéster insaturado, se añaden iniciadores y catalizadores para la iniciación de la formación de radicales libres como el peróxido de metil-etil-cetona (MEKP), y acelerantes como el octoato de cobalto [113].

Las resinas de poliéster insaturado son una de las resinas termoestables de mayor consumo, derivado de la gran variedad de posibilidades en su síntesis, que hace que tengan un gran abanico de posibilidades al poder ajustar las propiedades en función de la aplicación final.

2.3.2.1.2 Resina viniléster

Las resinas de viniléster combinan las propiedades físico-químicas de las resinas epoxi y los ciclos de curado de las resinas poliéster. La contracción en volumen de las resinas de viniléster, es del 5 al 10 %, inferior al producido en las resinas de poliéster, aunque superior a la resina epoxi. Además, debido al menor nivel de entrecruzamiento de las cadenas poliméricas de viniléster, las resinas curadas serán más flexibles y con mayor tenacidad que las de poliéster insaturado [114]. Se caracterizan por poseer una excelente resistencia química a multitud de agentes químicos [115].

De forma similar a la reacción de curado de las resinas de poliéster insaturado, en las resinas de viniléster la reacción de entrecruzamiento se produce por reacción de adición por radicales libres, en este sentido, uno de los iniciadores más utilizados es el MEKP y como acelerador, el octoato de cobalto [116-118].

Con curados a temperatura ambiente se consigue una polimerización del 85 % y una temperatura de transición vítrea (T_g) entre 60 y 100 °C, dependiendo de las condiciones de curado, espesor y la reacción exotérmica. Para conseguir mejores propiedades, generalmente es necesario un post-curado con temperaturas elevadas. Con temperaturas en torno a 130 °C se consiguen las propiedades de la resina prácticamente curada en su totalidad [114].

Su precio es superior a las resinas de poliéster, aunque sus propiedades y su mejor resistencia química la hacen muy atractiva para aplicaciones y equipos expuestos a ambientes que puedan alterar las propiedades del compuesto, como en sistemas de tuberías, conductos y tanques de almacenamiento, sin olvidar otros sectores como el del transporte, el del automóvil y el de las infraestructuras en ambientes salinos [119].

2.3.2.1.3 Resina epoxi

Las resinas epoxi, son las resinas más empleadas en los materiales compuestos de alta calidad, fundamentalmente, porque poseen mejores propiedades físicas y mecánicas que las resinas poliéster y viniléster. Además, presentan una buena capacidad de adhesión sobre una gran cantidad de materiales de refuerzo [114].

Poseen elevadas propiedades mecánicas, un buen comportamiento a temperatura elevada, baja contracción durante el curado (0-1 %) y buena resistencia al ataque de agentes químicos, siendo su principal inconveniente su elevado coste [120]. Y aunque esta resina es susceptible a la

humedad, tanto en su estado de curado como sin curar, su resistencia a la humedad y a los agentes ambientales son superiores a los del poliéster [121].

2.3.2.1.4 Resinas fenólicas

Las resinas fenólicas encuentran su principal campo de aplicación en productos que requieran un buen comportamiento frente al fuego y alta resistencia al calor. Además, entre sus principales propiedades podemos destacar, la resistencia a la abrasión, excelentes características dieléctricas, buena resistencia a agentes químicos (presentando una mala resistencia frente las disoluciones básicas), así como estabilidad dimensional y térmica [122]. Del mismo modo, cabe destacar que, las propiedades mecánicas a temperatura ambiente de los materiales compuestos fabricados con matriz fenólica, en general, son más bajas que sus homólogos en epoxi [123].

2.3.2.2 Fibras de refuerzo

En cuanto a las fibras de refuerzo, éstas son los componentes resistentes en un material compuesto y definen la mayor parte de las características mecánicas del material, como su resistencia y su módulo elástico. Por lo tanto, las propiedades del compuesto vienen determinadas por la contribución de la fibra al compuesto, que dependerán de [114]:

- Las propiedades de la propia fibra, mecánicas y geométricas como diámetro y longitud.
- La fracción en volumen de fibra.
- La orientación y disposición del refuerzo.
- La interacción de la superficie de la fibra y la resina (interfase).

En general, las fibras cortas se emplean en compuestos donde las solicitaciones no son exigentes o en elementos estructurales secundarios, mientras que los refuerzos de fibra continua se utilizan en elementos estructurales primarios y se consideran materiales estructurales de altas prestaciones. Las principales categorías de orientación de fibra son: unidireccional, tejido bidireccional equilibrado y no equilibrado, biaxial, multiaxial, y aleatorio [105,113].

Las mejores propiedades se consiguen cuando todas las fibras están alineadas e n la dirección del eje longitudinal de las fibras (unidireccional). Un laminado con estas características se obtiene mediante el uso de roving (mechas continuas) o lámina unidireccional.

El tejido bidireccional (equilibrado o no), se obtiene al entrelazar fibras de urdimbre (0°) y tramas (90°) en un modelo regular. En el tejido multiaxial, por el contrario, las fibras no están entrelazadas, consiste en una o más capas de fibras largas que son mantenidas en su lugar por un sistema de tejido secundario sin funciones estructurales. Por último, las fibras dispuestas

aleatoriamente, están presentes en un formato llamado *mat* o fieltro, basado en, hilos cortados a 30 a 40 mm, distribuidos con orientaciones aleatorias y aglomerados con una pequeña cantidad de un aglutinante. Además, mediante el corte automático de *roving* (empleado en la tecnología de fabricación de moldeo por proyección), se pueden obtener laminados con las fibras dispuestas aleatoriamente [114].

Desde el punto de vista de propiedades mecánicas, el uso de fibras continuas en la dirección del esfuerzo aplicado permite obtener una gran mejora, mientras que, con fibras cortas y partículas, el incremento en resistencia es menos significativo, obteniendo en cambio, una gran isotropía en el material [124].

2.3.2.2.1 Fibras de vidrio

La fibra de vidrio se fabrica a partir del vidrio fundido pasando por hileras de gravedad a una determinada temperatura y estiradas en caliente por bobinado a alta velocidad. En el proceso de hilado no cambia la estructura amorfa. Simultáneamente con el estiramiento se realiza el ensimaje de las fibras, que consiste en un tratamiento químico superficial de la fibra de vidrio que les proporciona, entre otros aspectos, una mejor adhesión a la matriz [125].

La resistencia disminuye cuando las fibras se ensayan en ambiente húmedo, debido a la absorción de agua por parte de la superficie del vidrio. Cuando se necesita gran resistencia a la humedad se prefiere un vidrio de boro-silicato; se le conoce con el nombre de vidrio “E” o “Eléctrico” [126].

La fibra de vidrio es el refuerzo más utilizado en los materiales compuestos de matriz polimérica. Entre sus principales ventajas destacan su bajo costo, alta resistencia a tracción y a impacto, y también buena resistencia química. Entre algunas de sus desventajas se incluye un módulo relativamente bajo, es abrasiva, baja resistencia a fatiga y una pobre adhesión con las resinas, mejorando extraordinariamente este aspecto con recubrimientos apropiados (ensimaje) [127].

Las fibras de vidrio son concebidas para satisfacer las demandas de la más variada índole, de ahí que estas fibras, puedan diferenciarse en los tipos citados a continuación (se citan las principales) [128]:

- A: Buena resistencia al ataque de soluciones ácidas
- B: Excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad
- C: Elevada resistencia química
- D: Altas propiedades dieléctricas

- E: Presenta el coste más reducido y es la más empleada en la fabricación de fibras continuas para plásticos reforzados.
- ERC: Propiedades eléctricas y resistencia química.
- R y S: Poseen la mayor resistencia entre las fibras de vidrio

La Tabla 2.6 muestra valores de propiedades mecánicas, físicas y térmicas de diversos tipos de fibra de vidrio.

Tabla 2.6 Propiedades de los distintos tipos de fibras de vidrio [91].

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (μm)	5-13	10-20	10	10
Densidad (Kg/m^3)	2500	2540	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72	86	85
Resistencia a tracción (GPa)	3.1	3.5	4.6	3.4-4.4
Módulo específico	28	28	34	33
Coef. expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{K}$)	8.6	5.0	5.1	5.0

La fibra de vidrio E, la fibra de mayor consumo, presenta la composición que se muestra en la Tabla 2.7 [129].

Tabla 2.7 Composición de la fibra de vidrio E [129].

Componente	Cantidad (%)
SiO_2	53-55
Al_2O_3	14-15
CaO	17-22
MgO	1
$\text{Na}_2/\text{K}_2\text{O}$	0,8
Fe_2O_3	0,3
B_2O_3	6-8

2.3.2.2.2 Fibras de carbono

Las fibras de carbono se refieren a aquellas fibras que poseen al menos un 92 % en peso de carbono en su composición. Pueden ser cortas o continuas y su estructura puede ser cristalina, amorfa o parcialmente cristalina [130].

En su fabricación se parte de una fibra orgánica, poliacrilonitrilo, que se somete a tres etapas (oxidación, carbonización y tratamiento de superficie). Cuando más elevada es la temperatura, las fibras obtenidas son de mayor módulo elástico y menor resistencia [106].

Se caracterizan por una elevada resistencia mecánica y módulo de elasticidad, baja densidad, baja resistencia al impacto, elevada resistencia a altas temperaturas, coeficiente de dilatación térmica prácticamente nulo, elevada resistencia a las bases, impermeabilidad al agua, elevada resistencia a la corrosión, buena conductividad eléctrica y térmica, sensibilidad a la abrasión, bajo alargamiento a la rotura y elevada resistencia a la fatiga [131].

Las fibras de carbono se pueden clasificar en función de la resistencia mecánica y el módulo elástico [132]:

- Tipo UHM (*ultra high modulus*): Fibras de carbono con módulo elástico superior a 500 GPa.
- Tipo HM (*high modulus*): Fibras de carbono con módulo elástico superior a 300 GPa y ratio resistencia-modulo inferior a 1 %.
- Tipo IM (*intermediate modulus*): Fibras de carbono con módulo elástico superior a 300 GPa y ratio resistencia-modulo superior a 1×10^{-2} .
- Tipo bajo módulo: Fibras de carbono con módulo elástico tan bajo como 100 GPa y baja resistencia.
- Tipo HT (*high tensile strength*): Fibras de carbono con resistencia superior a 3 GPa y ratio resistencia-modulo entre $1,5 \times 10^{-2}$ y 2×10^{-2}

2.3.2.2.3 Fibras de aramida

Las fibras de aramida son productos de origen sintético obtenidos mediante hilado de poliamidas aromáticas del tipo politereftalato de polifenilendiamina. La aramida, que es una palabra abreviada del término *aromatic polyamide*, está formada por poliparafenileno tereftalamida con una estructura química perfectamente regular cuyos anillos aromáticos dan como resultado cadenas poliméricas de moléculas. Las fibras son fabricadas por diferentes procesos de hilado y extrusión [106].

Entre las propiedades de la fibra de aramida caben destacar las siguientes [133]:

- Alta resistencia a tracción, debido a su alto grado de cristalinidad.
- Alto módulo de elasticidad y baja elongación a la rotura.
- Gran tenacidad lo que significa baja fragilidad
- Alta resistencia al impacto y alta capacidad de absorción de energía.
- Buena estabilidad mecánica en el rango térmico entre -30 °C y 200 °C. Es recomendable trabajar con este tipo de fibra en un rango térmico estable.
- Aceptable estabilidad química, aunque es susceptible de ser atacada por ácidos fuertes.

Sin embargo, los aspectos negativos del Kevlar podrían resumirse en una mala resistencia a compresión y gran absorción de humedad (hasta un 5 %).

Según el procedimiento de fabricación, distinguimos dos tipos de fibras de aramida en función de la rigidez [106]:

- Fibras de bajo módulo (LM), siendo $E = 70 \text{ GPa}$
- Fibras de alto módulo (HM), siendo $E = 130 \text{ GPa}$

En la Tabla 2.8, se muestra una comparativa de las propiedades mecánicas (módulo elástico y resistencia a rotura) y propiedades mecánicas específicas (módulo elástico y resistencia a rotura específica) de diferentes fibras comerciales y materiales convencionales [134].

Tabla 2.8 Propiedades de las fibras y otros materiales convencionales [134].

Material	E_T GPa	σ_T GPa	ρ g/cm ³	E_T/ρ (10 ⁹ ·N·m)/kg	σ_T/ρ (10 ⁹ ·N·m)/kg
Fibras					
E-glass	72	3.5	2.54	29	1.38
S-glass	86	4.6	2.48	35	1.85
Carbono de alto módulo	390	2.1	1.90	205	1.10
Carbono de alta resistencia	240	2.9	1.77	136	1.64
Kevlar-49	130	2.8	1.45	87	1.87
Kevlar-29	60	2.8	1.44	42	1.80
Boro	385	2.8	2.63	146	1.1
Spectra-1000	117	2.6	0.97	120	2.8
Materiales convencionales					
Acero	210	0.34-2.1	7.8	27	0.043-0.27
Aleaciones de aluminio	70	0.14-0.62	2.7	26	0.052-0.23
Vidrio	70	0.7-2.1	2.5	28	0.28-0.84
Tungsteno	350	1.1-4.1	19.3	18	0.057-0.21
Berilio	300	0.7	1.4	164	0.38

E_T : módulo de tracción; σ_T : tensión de tracción; ρ : densidad;

E_T/ρ : módulo específico; σ_T/ρ : tensión específica

2.3.3 Comparativa con otros procesos de fabricación de materiales compuestos

2.3.3.1 Laminado manual

El laminado manual es un proceso primitivo pero efectivo, que todavía es ampliamente utilizado para la fabricación de prototipos y lotes pequeños de producción. Algunas de las principales ventajas del laminado manual, deriva del bajo coste en equipamiento y herramientas. Las mayores desventajas están relacionadas con la ausencia de un control del espesor de la pieza fabricada, contenido en fibra y huecos, así como, la limitación de fabricar una pieza únicamente con una cara lisa (aquella que está en contacto con el molde) [135].

El formato de fibra elegido se impregna a mano con la resina mediante rodillos o brochas, para forzar a la resina a entrar en los tejidos de refuerzo, tal y como se muestra en la Figura 2.7. Este paso se repite hasta conseguir el espesor deseado. La naturaleza de los refuerzos más comunes son el vidrio E y la resina poliéster, aunque el carbono, aramida, así como otras matrices, también pueden emplearse [136].

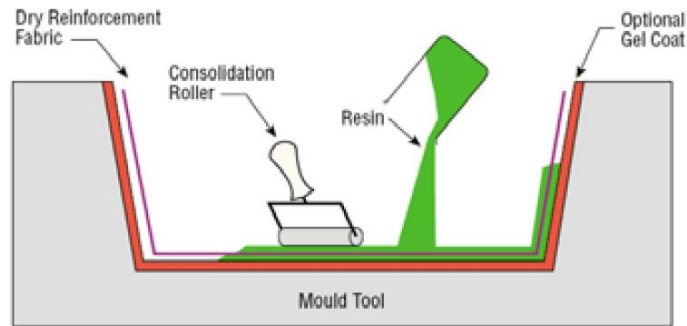


Figura 2.7 Proceso de laminado manual [114].

En la Tabla 2.9, se muestran las características principales del laminado manual.

Tabla 2.9 Ficha técnica del laminado manual (adaptado de [137]).

Parámetros de proceso	Factores de coste	Ventajas	Desventajas
Fracción en volumen de fibra: 0,13-0,5	Coste de producción: Alto	Bajo desembolso de capital	Dependiente del operario
Rango de tamaño: 0,25-2000m ²	Coste de material: Moderado	Posibilidad de sobrelaminar	Elevada mano de obra
Presión de procesado: ambiente	Coste de utillajes: Reducido	Sin limitación de tamaño	Baja productividad
Temperatura de procesado: ambiente	Coste de equipamiento: Muy Reducido	Flexibilidad	Escaso control de peso y de espesor
Capacidad de producción: 1-4 piezas / día y molde			Solo una cara obtenida de molde

2.3.3.2 Moldeo por proyección

Presenta gran semejanza con el laminado manual. La diferencia fundamental reside en que la proyección de resina catalizada y fibra se realiza mediante una pistola específica. El formato de fibra que se empleada es fibra discontinua cortada a la longitud de seada, si bien, pueden añadirse tejidos de fibra para dotar a la pieza de un refuerzo adicional. Los productos obtenidos son similares a los obtenidos por laminado manual, si bien, la productividad del proceso es superior, ya que, además puede automatizarse el sistema de dosificación [138].

El *roving* de fibra y la resina catalizada alimentan una pistola de mano, en el que la fibra se corta y se pulveriza hacia el molde junto con la resina catalizada, tal y como se muestra en la Figura 2.8. Después, es posible, si se necesita, arrodillar la mezcla resina-fibra del molde para eliminar las burbujas de aire producidas por el sistema de proyección [136].

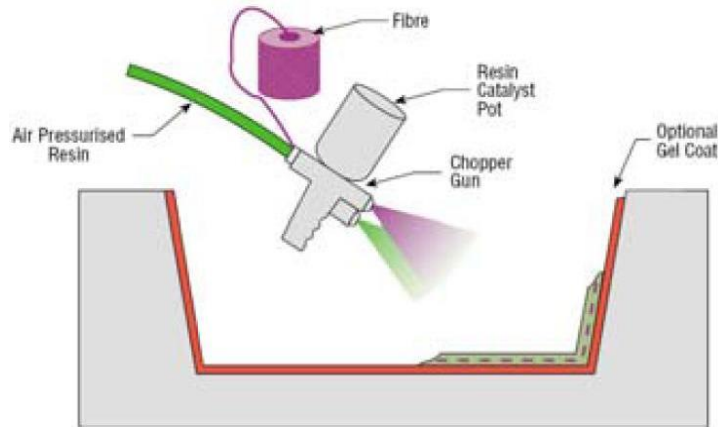


Figura 2.8 Proceso de moldeo por proyección [114].

En la Tabla 2.10, se muestran las características principales del moldeo por proyección.

Tabla 2.10 Ficha técnica del moldeo por proyección (adaptada de [137]).

Parámetros de proceso	Factores de coste	Ventajas	Desventajas
Fracción en volumen de fibra: 0,13-0,21	Coste de producción: Reducido	Coste reducido de las materias primas	Dependiente del operario
Rango de tamaño: 2,0-100m ²	Coste de material: Reducido	Elevada productividad	Solo refuerzo de fibra corta
Presión de procesado: ambiente	Coste de utillajes: Reducido	Coste reducido de los utillajes	Muy escaso control de peso y de espesor
Temperatura de procesado: ambiente	Coste de equipamiento: Moderado	Piezas grandes	Solo una cara obtenida de molde
Capacidad de producción: 1-4 piezas / día y molde			

2.3.3.3 Moldeo por infusión de resina

El moldeo por infusión de resina, es una tecnología capaz de fabricar piezas complejas de materiales compuestos con un elevado control de propiedades, mayor contenido de refuerzo, menores emisiones de productos químicos y menor costo que otros procesos de transformación de composites. Debido a ciertas ventajas que posee sobre el moldeo por transferencia de resina tradicional, éste, es utilizado en la fabricación de grandes componentes [139].

Tal como se muestra en la Figura 2.9, la fabricación de piezas de moldeo por infusión de resina, se realiza mediante la infusión de una resina termoestable en estado líquido, en un formato de fibra colocado en la cavidad del molde, a su vez sellada por una membrana o film de vacío. La resina es forzada a entrar al molde, ya que, se genera un vacío por la bomba [140].

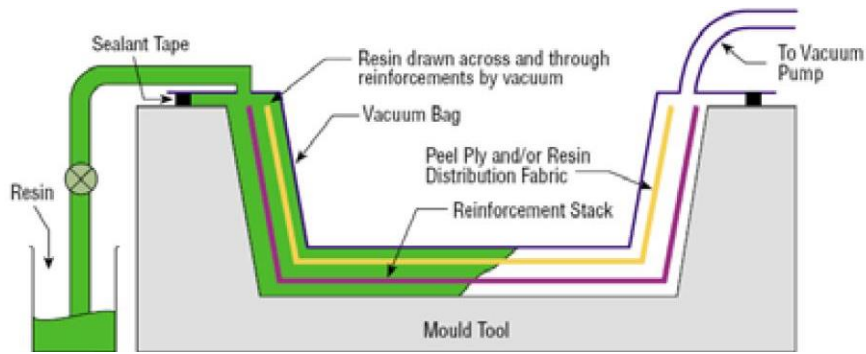


Figura 2.9 Proceso de moldeo por infusión [114].

En la Tabla 2.11, se muestran las características principales del moldeo por infusión.

Tabla 2.11 Ficha técnica del moldeo por infusión de resina (adaptada de [137]).

Parámetros de proceso	Factores de coste	Ventajas	Desventajas
Fracción en volumen de fibra: 0,15-0,35	Coste de producción: Moderado	Elevado contenido de fibra	Proceso que no admite modificaciones durante el proceso de infusión
Rango de tamaño: 1,0-30m ²	Coste de material: Moderado	Reducido coste y peso de los utillajes	Dificultad para realizar reparaciones y modificaciones
Presión de procesado: max. 2 bar	Coste de utillajes: Reducido	Amplio rango de refuerzos	
Temperatura de procesado: 15-30 °C	Coste de equipamiento: Reducido	Piezas grandes	
Capacidad de producción: 1-15 piezas / turno y molde			

2.3.3.4 Moldeo por transferencia de resina (RTM)

El moldeo por transferencia de resina (RTM), tal y como se muestra en la Figura 2.10, es un proceso de molde cerrado en el que se introduce la preforma de fibra y la resina catalizada se transfiere a la cavidad del molde a través de los puertos de inyección a una presión relativamente baja (normalmente inferior a 690 kPa). Se permite que el aire desplazado escape a través de los respiraderos para evitar zonas secas. El ciclo de curado depende del grosor de la pieza, la temperatura del molde y el sistema de resina. La pieza se cura en el molde, normalmente en un molde calefactado, y se extrae del molde cuando alcanza un curado suficiente [141].

El proceso de moldeo por transferencia de resina produce piezas relativamente grandes y geoméricamente complejas a bajo costo. Presenta un ciclo relativamente corto y buena calidad

superficial. Dado que RTM no está limitado por el tamaño del autoclave o por presión, sería posible la realización de nuevos desarrollos, para la fabricación de piezas mayores. Por ejemplo, un proceso de RTM automatizado en las operaciones de preformado, cargado del refuerzo, desmoldeo y recorte, permite incrementar sustancialmente la productividad del proceso de fabricación [142].

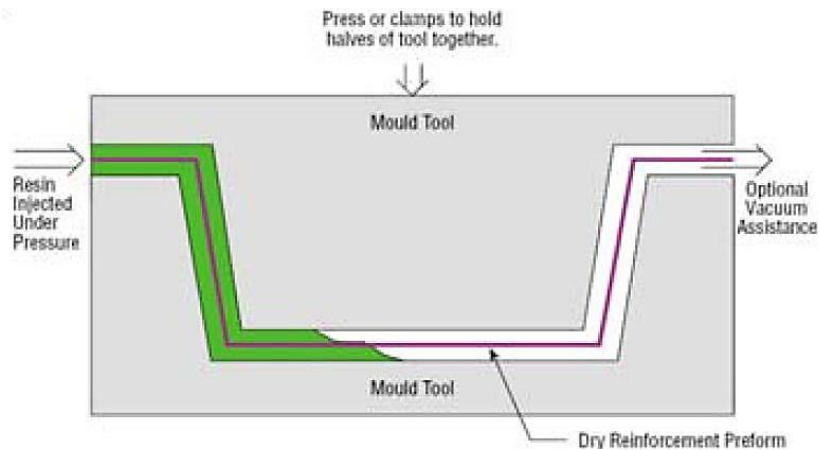


Figura 2.10 Proceso de moldeo por RTM [114].

En la Tabla 2.12 se muestran las características principales del RTM.

Tabla 2.12 Ficha técnica del RTM (adaptada de [137]).

Parámetros de proceso	Factores de coste	Ventajas	Desventajas
Fracción en volumen de fibra: 0,1-0,15	Coste de producción: Moderado	Buen acabado superficial en ambas caras de la pieza	Coste de utillajes
Rango de tamaño: 0,25-5,0m ²	Coste de material: Moderado	Precisión dimensional	Fracción en volumen de refuerzo
Presión de procesado: max. 2 bar	Coste de utillajes: Moderado	Posibilidad de moldear geometrías relativamente complejas	
Temperatura de procesado: 20-50 °C	Coste de equipamiento: Moderado	Ratio de productividad relativamente alto	
Capacidad de producción: 1-4 piezas / hora y molde			

2.3.3.5 Pultrusión

La pultrusión (Figura 2.11) es un proceso continuo de moldeo para producir perfiles estructurales rectos, de sección constante y de gran longitud. Los filamentos continuos (*roving*) se hacen pasar tirando de ellos por un baño de resina y después a través de un molde calentado.

El molde calefactado completa la impregnación de la fibra, controla el contenido en resina y cura el material hasta su forma final. El perfil curado se corta automáticamente a la longitud deseada [138].

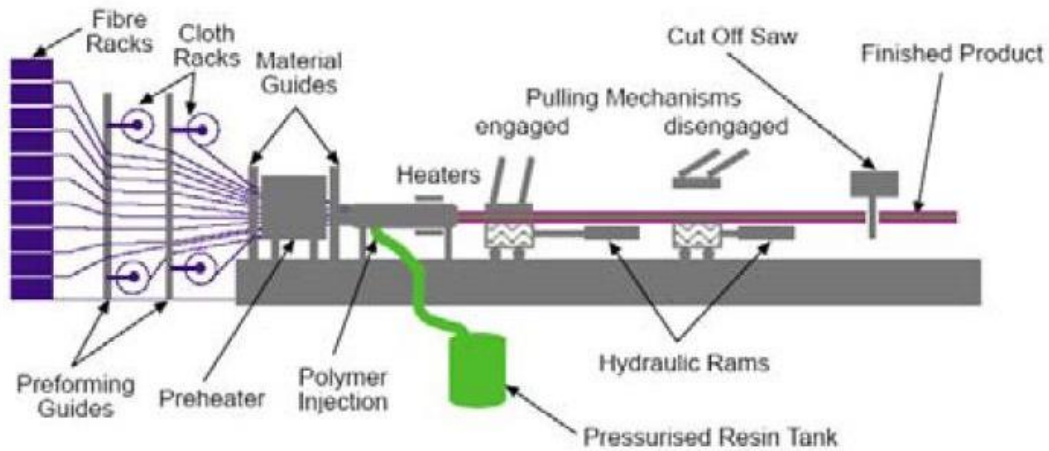


Figura 2.11 Proceso de pultrusión [114].

En la Tabla 2.13, se muestran las características principales de la pultrusión:

Tabla 2.13 Ficha técnica de la tecnología pultrusión (adaptada de [137]).

Parámetros de proceso	Factores de coste	Ventajas	Desventajas
Fracción en volumen de fibra: 0,3-0,65	Coste de producción: Bajo	Elevada productividad	Limitación en formas de piezas
Hasta 1m de ancho	Coste de material: Moderado	Elevadas propiedades mecánicas	Propiedades mecánicas en la dirección transversal
Presión de procesado: varía	Coste de utillajes: Elevado		
Temperatura de procesado: 130-150 °C	Coste de equipamiento: Elevado		
Capacidad de producción: 10-30 m/h			

2.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN: DISPOSITIVO DE CUBRIMIENTO

2.4.1 Problemática actual y solución planteada

Los dispositivos de cubrimiento de desagüe de fundición situados en muchas de las calzadas de numerosas ciudades y pueblos presentan la problemática de las sustracciones. Como resultado de ello, se pueden generar accidentes tanto de automóviles al introducirse la rueda delantera, como de personas al cruzar transversalmente la calzada.

Además de los mencionados problemas, existen otros menos relevantes, no relacionados con la integridad física de las personas, pero sí con el confort y con la calidad del producto (que son solventados con el uso de un material polimérico reforzado) como por ejemplo, la eliminación o reducción considerable del ruido debido al paso del tráfico rodado, la ligereza, que hace que los operarios puedan realizar los trabajos más fácil y rápidamente cuando necesitan acceder a las redes de saneamiento y la durabilidad y estética del producto a largo plazo.

Se advierten tres soluciones que solventan al menos la primera problemática, la más relevante, por el riesgo que implica a las personas. La primera solución trata de la instalación del conjunto completo de dispositivo de cubrimiento (marco y rejilla) de fundición con un mecanismo antirrobo.

La segunda solución, es idéntica a la primera con la diferencia de que el conjunto marco-rejilla que se instala no posee un mecanismo antirrobo como tal y además ambos componentes son de naturaleza polimérica, concretamente, de GFRP.

La tercera y última solución, que es la que se ha desarrollado en el presente trabajo, trata de colocar exclusivamente una rejilla específicamente diseñada en GFRP, para ser situada en aquellos marcos de rejillas que han sido sustraídos.

Si se realiza una clasificación de las soluciones planteadas desde el punto de vista no sólo del confort y de la calidad del producto instalado o colocado, sino también desde el punto de vista del impacto económico y de las molestias generadas a la ciudadanía, se advierte que la tercera solución es la más favorable, a continuación, la segunda solución y finalmente, la primera solución.

La primera y segunda solución presentan la gran desventaja de requerir una considerable cantidad de recursos en su instalación. Requiere de numerosos equipos y herramientas para la extracción del marco embebido en el hormigón de la calzada, así como, de un espacio vallado para el corte del tráfico (si el dispositivo de cubrimiento en cuestión no está situado en un lateral de la calzada), además de un tiempo relativamente largo de instalación, con el riesgo que ello conlleva para los operarios allí presentes. Este proceso de instalación se puede observar en la Figura 2.12.



Figura 2.12 Pasos para la instalación de un nuevo dispositivo de cubrimiento de calzada.

En definitiva, es una instalación económicamente costosa, que pone en riesgo a los operarios que allí trabajan y además, puede generar considerables molestias a los conductores de los automóviles que circulan por esa calzada, generando caravanas y con ello retrasos y quejas a los correspondientes ayuntamientos.

La tercera solución, por el contrario, no requiere de una instalación tan compleja. En este caso en concreto, simplemente se coloca la rejilla polimérica fabricada, en el hueco del marco de aquella rejilla que ha sido sustraída.

Este proceso de instalación es sustancialmente menos complejo y aparatoso, no solamente en cuanto al tiempo de instalación, sino también, al equipamiento y herramientas a emplear, ya que, únicamente se requiere parar el tráfico por unos minutos para colocar dentro del marco, una rejilla ligera de forma manual.

Por lo tanto, esta solución, no solamente reduce considerablemente los costes del operativo allí desplegado, sino también, disminuye sustancialmente tanto el riesgo de atropello de los trabajadores como las posibles molestias generadas a los usuarios debido a las retenciones de tráfico.

Sin embargo, para materializar dicha tercera solución es necesario enfrentarse y superar una serie de retos tecnológicos, que no son triviales. Por un lado, uno de los retos proviene de la necesidad de encontrar unos materiales poliméricos suficientemente resistentes, como para diseñar una rejilla, relativamente compacta, que encaje en la altura del marco y no sobresalga por encima de la superficie de la calzada. Además, estos nuevos materiales no deben ser excesivamente costosos, ya que, si bien, los gastos de operación de esta tercera solución serían sustancialmente más bajos (que los del dispositivo de cubrimiento del estado del arte actual), el producto actual (fabricado en fundición de hierro) es muy económico.

Así pues, es necesario emplear un compuesto polimérico reforzado que se obtenga a partir de unos materiales de partida (fibras y resinas) económicos. Un ejemplo de estos materiales son las resinas termoestables poliéster y la fibra de vidrio E.

Por el otro lado, se requiere emplear un proceso de fabricación que se adapte a las necesidades de fabricación de las rejillas. En este sentido, el número de piezas mensuales a fabricar viene dada por el número de sustracciones ocurridas para cada modelo de rejilla en los municipios. Debido a que el número de sustracciones varía en función del municipio, número de rejillas existentes de un mismo modelo, temporada, tamaño, etc. el proceso de fabricación empleado deberá ser lo suficientemente flexible para adaptarse a diferentes escenarios de producción o necesidad.

Se estima que el número de sustracciones al año para un modelo de rejilla se sitúe en el rango de la centena a millares de unidades por año, es decir, un contexto de series bajas o medias-bajas de fabricación. Sin embargo, existen abundantes tipos de modelos. Por ello, el utillaje o molde a fabricar debe ser lo más económico posible para evitar que un coste de inversión demasiado elevado, incremente excesivamente el coste de la rejilla fabricada.

2.4.2 El dispositivo de cubrimiento

Existen diversos dispositivos de cubrimiento y cierre de calzada que se emplean en zonas de circulación utilizadas por peatones y vehículos. Los más importantes son las tapas de registro y las rejillas de desagüe (Figura 2.13). La tapa de registro es una cubierta utilizada para proteger la boca de acceso de un pozo de visita, se encuentran con frecuencia en los sistemas de alcantarillado y de servicios públicos. La tapa debe ser robusta, para resistir el paso de personas y vehículos, mientras que, al mismo tiempo, debe permitir el acceso de trabajadores para inspección y mantenimiento. La rejilla de desagüe, sumidero, o sistema de drenaje, está diseñado

para drenar el exceso de lluvia y agua superficial desde calles pavimentadas, playas de estacionamiento, aceras y azoteas. Los desagües varían en diseño desde pequeños pozos secos residenciales a grandes sistemas municipales. Ellos son alimentados por las cunetas que hay en la mayoría de las autopistas, carreteras y otros caminos muy transitados, como así también en poblaciones de áreas que experimentan lluvias fuertes, inundaciones y poblaciones costeras que experimentan tormentas frecuentes. Muchos sistemas de drenaje para tormentas están diseñados para drenar el agua de tormenta, sin tratar, hacia ríos o corrientes de agua.



Figura 2.13 Tapa de registro (izquierda) y reja de desagüe (derecha).

2.4.3 Normativa vigente

La normativa que aplica a los mencionados dispositivos es la norma EN 124-1 (o UNE EN 124-1 norma española): “Dispositivos de cubrimiento y de cierre para zonas de circulación utilizadas por peatones y vehículos”.

Esta norma tiene por objeto especificar las definiciones, la clasificación, los principios generales de diseño, los requisitos de comportamiento y los métodos de ensayo para los dispositivos de cubrimiento y de cierre de acuerdo con las normas:

- EN 124-2, para dispositivos de cubrimiento y de cierre de fundición
- EN 124-3, para dispositivos de cubrimiento y de cierre de acero o de aleaciones de aluminio
- EN 124-4, para dispositivos de cubrimiento y de cierre de hormigón armado
- EN 124-5, para dispositivos de cubrimiento y de cierre fabricados de materiales compuestos
- EN 124-6, para dispositivos de cubrimiento y de cierre de polipropileno, polietileno o poli(cloruro de vinilo) no plastificado.

Siendo la parte 1 de la norma sólo aplicable junto con, al menos, una de las Normas EN 124-2, EN 124-3, EN 124-4, EN 124-5 y EN 124-6 cada una de las cuales tiene esta parte 1 como una parte integral.

Esta norma europea es aplicable a los dispositivos de cierre y de cubrimiento con una cota de paso de hasta e inclusive 1.000 mm para cubrir sumideros, pozos de registro y arquetas de inspección instalados en áreas sometidas a circulación peatonal y/o tráfico de vehículos.

2.4.4 Clases de dispositivos

Los dispositivos de cubrimiento y cierre empleados en zonas de circulación de peatones y vehículos se clasifican, según la norma EN 124, en seis diferentes grupos: A15, B125, C250, D400, E600 y F900 (Figura 2.14) [143].

- A15: Zonas susceptibles de ser utilizadas exclusivamente por peatones y ciclistas
- B125: Aceras, zonas peatonales y superficies similares, áreas de estacionamiento y aparcamiento de varios pisos para coches.
- C250: Para los dispositivos de cubrimiento instalados sobre arcenes y en la zona de las cunetas de las calles, que medida a partir del bordillo se extiende de 0,50 m sobre la calzada y de 0,20 m sobre la acera.
- D400: Calzada de carreteras (incluyendo calles peatonales), arcenes estabilizados y zonas de aparcamiento para todo tipo de vehículos.
- E600: Áreas por las que circulan vehículos de gran tonelaje, por ejemplo, pavimentos de aeropuertos, muelles
- F900: Zonas sometidas a cargas particularmente elevadas, por ejemplo, pavimento de aeropuertos.

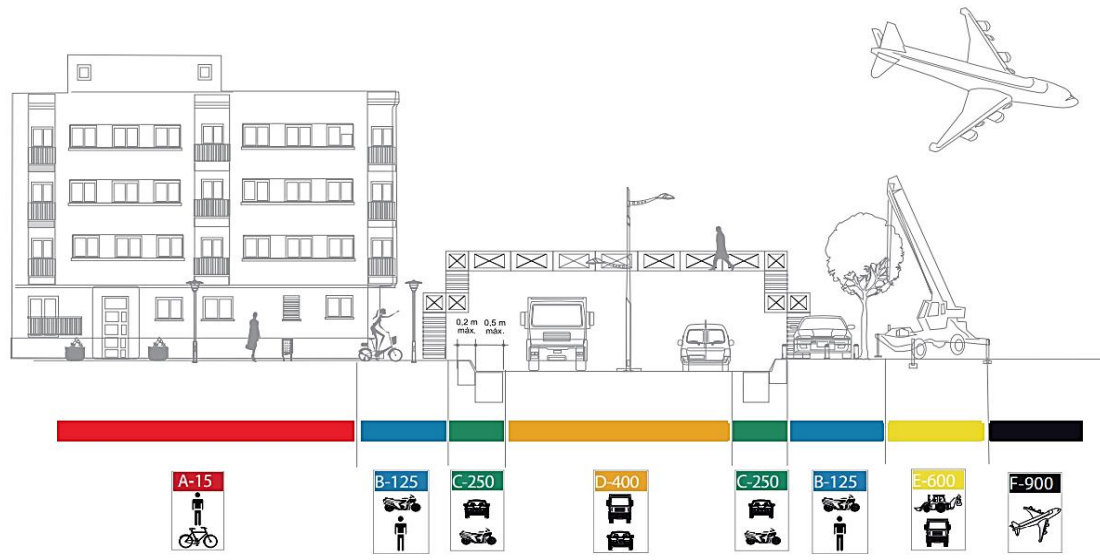


Figura 2.14 Localización de las seis clases de dispositivo de cubrimiento [143].

2.4.5 Diseños, formas y tamaños de dispositivos

Independientemente de la clase, los dispositivos de cubrimiento y cierre se pueden encontrar en multitud de tamaños, formas (circulares, cuadrados, rectangulares, etc) y diseños en función de las necesidades del cliente (generalmente ayuntamientos). Ellos, indican que tamaño y forma de dispositivo es requerido y su localización. A partir de estas premisas, se diseñan y se construyen las arquetas de registro o las rejillas de desagüe.

A continuación, de la Figura 2.15 hasta la Figura 2.19, se muestran algunas de las formas y diseños de arquetas de registro y rejillas de desagüe:



Figura 2.15 Tapas de registro circulares y cuadradas [144].



Figura 2.16 Tapas de registro triangulares y rellenables de hormigón [145].



Figura 2.17 Rejillas de desagüe cuadradas cóncavas y circulares [146].



Figura 2.18 Rejillas de desagüe rectangulares con rejas rectas y oblicuas [147].



Figura 2.19 Rejillas de desagüe rectangulares con rejas curvas y rectas cóncavas [148].

2.4.6 Desarrollos de los últimos años

En el ámbito de los dispositivos de cubrimiento y cierre, en los últimos años, se han realizado numerosos desarrollos que han supuesto, sin duda, una mejora del producto y servicio respecto del estado del arte. Uno de los desarrollos más importantes ha sido el empleo de nuevos

materiales, concretamente, el empleo de materiales no metálicos, de esta forma, la fundición de hierro y el hormigón ya no son los únicos materiales de construcción.

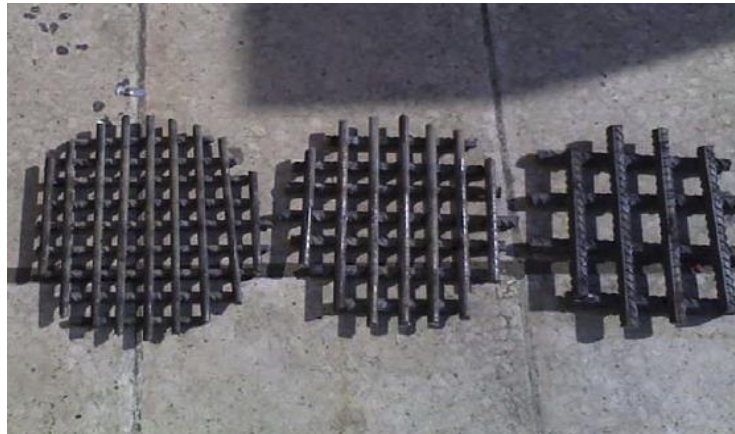


Figura 2.20 Mallas empleadas en la fabricación de las tapas de registro [150].

Algunos de los nuevos materiales que se han empleado en este ámbito han sido el hormigón polimérico basado en resina epoxi [149], desechos termoplásticos reforzados con una malla de acero (Figura 2.20) [150]. El uso de termoestable reforzado con fibra de vidrio transformado mediante diferentes tecnologías de fabricación, como pueden ser el RTM [151], o una variante de *Reinforced reaction injection molding* [152]. Éste último, incluso, posee una patente de alcance internacional (Figura 2.21) [153].

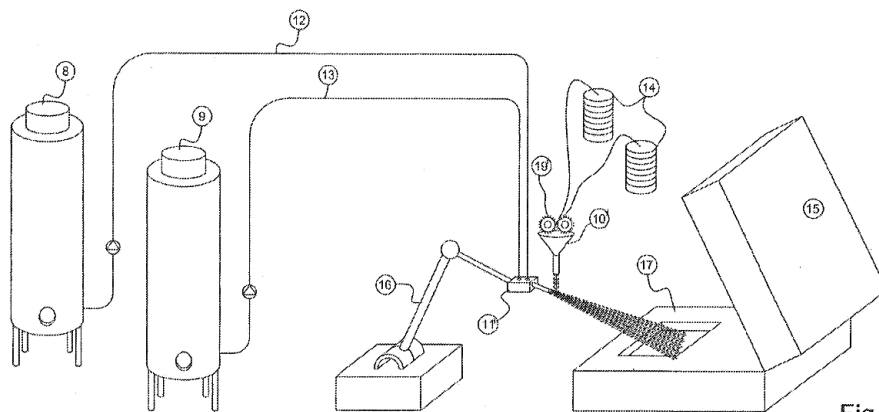


Fig. 5

Figura 2.21 Esquema de fabricación patentado [153].

2.5 EPOXY TOOLING

2.5.1 Rapid tooling

Para agilizar la etapa de desarrollo de producto se desarrolló la tecnología *Rapid Prototyping* (RP), un conjunto de técnicas en el que la pieza se genera añadiendo material capa a capa. Sin embargo, en general, las técnicas RP no pueden producir prototipos con las mismas propiedades

que poseería el producto industrial y, además, en muchos casos, presentan un coste prohibitivo a la hora de fabricar una serie con decenas o centenas de unidades. Por lo tanto, es necesario disponer de utillajes complementarios, que sean competitivos en este escenario de producción y sean capaces de producir piezas en materiales representativos [154].

El método RT es la tecnología que adopta técnicas de RP y las aplica a la fabricación de utillajes [155]. Este procedimiento se está utilizando como una alternativa para la producción de pequeños lotes de piezas en materiales representativos cuando la cantidad de piezas es insuficiente como para justificar el uso de moldes acero [156]. Por ejemplo, el ahorro de tiempo y de coste oscila entre el 50 % y el 90 %, según el tamaño de la producción [157]. Estos beneficios han dado como resultado el desarrollo de numerosos métodos de RT [154].

Tal y como se muestra en la Figura 2.22 el conjunto de técnicas RT se clasifican en función de la dureza del utillaje (*soft* o *hard tooling*) y en función del método de fabricación (*Direct tooling* o *Indirect tooling*). En la metodología *Direct tooling* el utillaje se emplea directamente para producir piezas tras la fabricación mediante RP, mientras que el sistema *Indirect tooling* crea un modelo mediante RP y sobre éste se realizan coladas de diversos materiales [158].

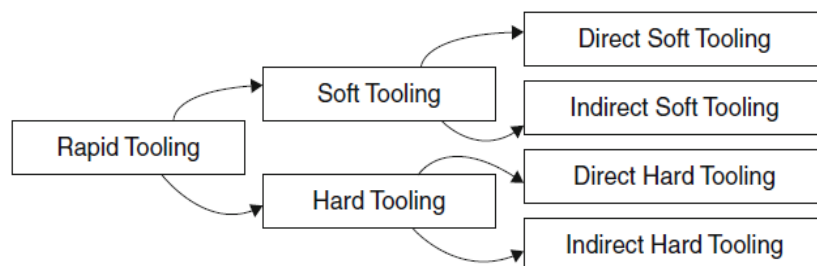


Figura 2.22 Clasificación de las técnicas *Rapid tooling* [158].

La gama de materiales que se emplean en la fabricación de utillajes RT incluye cera, madera, fotopolímeros, polímeros termoplásticos, aleaciones metálicas, cerámica, etc [159]. En el caso de los utillajes fabricados mediante la técnica *Indirect soft tooling* (IST) los materiales comúnmente utilizados son: silicona, resina epoxi y aleaciones metálicas de bajo punto de fusión.

A pesar de existir cierta diversidad de materiales, los compuestos basados en resina epoxi son unos de los más utilizados en aplicaciones IST porque poseen buenas propiedades mecánicas, resistencia a altas temperaturas, presentan un fácil procesado y un coste de materia prima relativamente reducido [160-162]. Además, los utillajes fabricados con este material muestran

un acabado superficial y precisión geométrica relativamente elevada, de modo que, poseen la capacidad para fabricar piezas de relativa complejidad geométrica [159]. En consecuencia, los utillajes fabricados mediante la técnica *epoxy tooling* son competitivos en la fabricación de lotes pequeños de producción [162].

2.5.2 Implementación de la técnica *epoxy tooling*

Las ventajas de los utillajes epoxi explican su reciente implementación en diversas tecnologías de fabricación, como por ejemplo, el moldeo por inyección de termoplásticos, el moldeo por inyección de cera en el proceso de fundición a la cera perdida, el conformado en frío de metales de bajo límite elástico, el conformado en caliente y el moldeo por inyección de silicona líquida.

2.5.2.1 Moldeo por inyección de termoplásticos

El proceso de moldeo por inyección de termoplásticos se ha convertido en uno de los procesos más utilizados para fabricar productos plásticos debido entre otros aspectos a su alta productividad [163]. Sin embargo, los fabricantes de moldes de inyección requieren reducir el tiempo y los costes de fabricación cuando es necesario fabricar una preserie, sin afectar la calidad del producto final [164,165].

De esta necesidad surgió el desarrollo de una alternativa de bajo coste a los moldes de acero convencionales, conocida como moldes híbridos. Este método de construcción de utillajes se basa en un marco de acero en el que se introduce un inserto fabricado mediante mecanizado o colada de resina cargada con cargas metálicas [166,167].

Entre las mencionadas cargas, las partículas de aluminio se utilizan con frecuencia para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas, para reducir el desgaste del inserto y disminuir el coste del compuesto [168-170].

Diversos investigadores han comparado las ventajas y desventajas de los moldes epoxídicos para el proceso de inyección frente a otra tipología de moldes fabricados mediante otra técnica de RT, como, por ejemplo, la sinterización selectiva por láser (SLS).

En este sentido, Pontes et al [169], analizaron las diferencias entre las piezas inyectadas en dos tipos de moldes: moldes epoxídicos y moldes de acero inoxidable fabricados mediante SLS. Su estudio, de acuerdo con la investigación llevada a cabo por Gonçalves et al. [170], reveló que existía una problemática en el desmoldeo de las piezas del molde epoxi. Un problema que se

resolvió rociando un agente de desmoldeo a base de silicona sobre la superficie de moldeo. Por el contrario, las dificultades de desmoldeo no se superaron en el molde de sinterizado, debido a su elevada rugosidad.

Asimismo, Khushairi et al. [159], confirmaron las observaciones mencionadas anteriormente sobre los problemas de desmoldeo, e igualmente destacaron las limitaciones de diseño que poseen los moldes epoxi con relación a las nervaduras y las paredes delgadas, debido a que éstas, si son excesivamente esbeltas, podrían romperse durante el moldeo por inyección.

Además, su estudio reveló que ciertas prestaciones de las piezas moldeadas se veían afectadas debido a la relativa baja conductividad térmica del molde. Por lo tanto, la mejora de las propiedades mecánicas y térmicas de los compuestos producirán moldes más robustos y piezas de mejores características en cuanto a, por ejemplo, estabilidad dimensional.

Cheah et al. [171] compararon el coste, el tiempo de entrega y la precisión dimensional de los moldes epoxi y convencionales de acero en la producción de piezas de termoplástico inyectadas. En comparación con los moldes tradicionales, los moldes epoxi (Figura 2.23) son capaces de reducir tanto el coste como el tiempo de entrega (para la producción de una carcasa frontal de teléfono móvil) hasta un 25 % y 50 %, respectivamente.

Sin embargo, en términos de precisión y calidad superficial de la pieza, aún se requieren mejoras significativas, como reducir la contracción de la pieza moldeada y aumentar la calidad de la superficie del modelo fabricado mediante RP. Ferreira y Mateus [172] también obtuvieron conclusiones similares.



Figura 2.23 Moldes de una carcasa de teléfono [171].

2.5.2.2 Moldeo por inyección de cera

La fundición a la cera perdida es un proceso en el que se moldean piezas metálicas con formas geométricas complejas [173]. En este proceso de fabricación, también, la técnica *epoxy tooling* se utiliza para la fabricación rápida y económica de moldes, y aunque los tiempos de enfriamiento de las piezas a moldear son más largos, dichos moldes de inyección fabricados en epoxi con partículas de aluminio son muy competitivos para la producción de pequeños lotes de modelos de cera, porque reducen el tiempo de entrega de una preserie en comparación con el enfoque tradicional de molde de acero mecanizado [174].

Kuo et al. [175] también obtuvieron ventajas similares tras moldear modelos de cera con moldes de resina epoxi con canales conformables de refrigeración fabricados según se muestra en la Figura 2.24. En comparación con el método tradicional de fabricación de moldes, esta tecnología destaca por ser un proceso de fabricación simple, con bajos costes de producción y tiempos de fabricación.

Kuo y Wu [176]. realizaron un estudio adicional, en el que se investigaron diferentes composiciones epoxi para fabricar un molde de inyección de cera de bajo costo con un alto rendimiento de enfriamiento. Los moldes fabricados con las composiciones preferidas mejoraron la eficiencia de enfriamiento y el costo del material en comparación con el molde comercial de epoxi cargado con partículas de aluminio. De la misma manera, Kuo et al. [177] compararon el molde epoxi con la técnica de modelado por deposición de hilo fundido en la fabricación de moldes de inyección de cera.

En este sentido, Cheah et al. [178] obtuvieron resultados similares, ya que, los moldes de inyección de cera se fabricaron en aproximadamente la mitad del tiempo en comparación con los métodos convencionales.

Asimismo, Rahmati et al. [179] desarrollaron un molde de inyección de cera con canales conformables para la fabricación de un componente para la caja de cambios de automóvil. Este molde se fabricó mediante colada de resina epoxi cargada con partículas de aluminio sobre unas carcasas fabricadas mediante estereolitografía (SLA). Se logró un ahorro en la fabricación del molde del 50 % y 60 % en tiempo y en coste, respectivamente, en comparación con el método de producción convencional. Además, la ausencia de daños en el molde tras la fabricación de preseries permitió afirmar que era posible una producción en masa de modelos de cera.

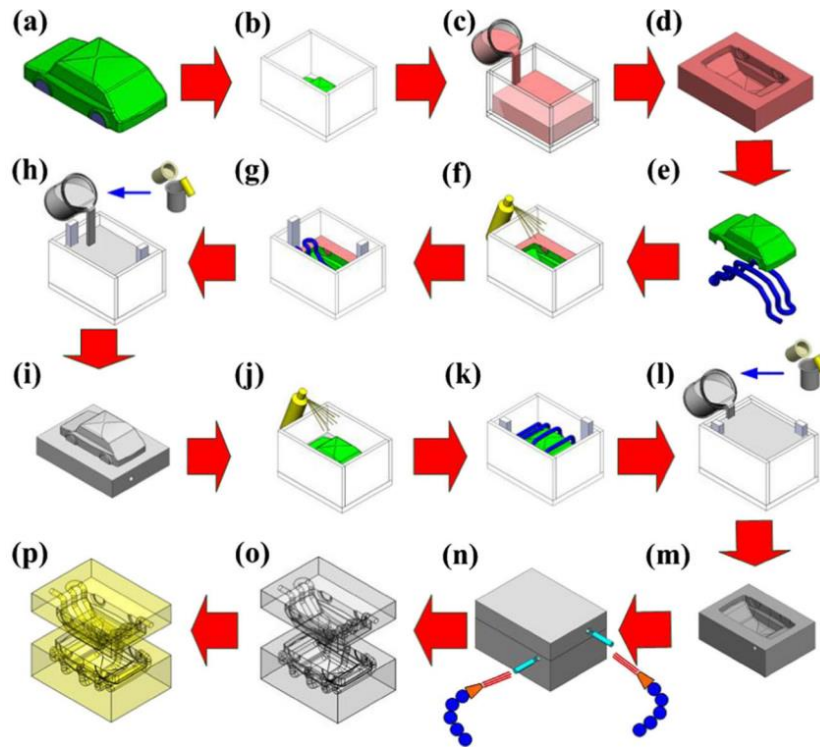


Figura 2.24 Metodología para fabricar un molde de inyección de cera con canales de enfriamiento conformables. (a) Modelo; (b) Colocación del modelo en el marco del molde; (c) colada de silicona; (d) molde de silicona; (e) Diseño de los canales de enfriamiento conformables; (f) Colocar el molde de silicona y el modelo en el marco del molde; (g) Colocación de los canales conformables en el marco del molde (h) Colada de epoxi con carga de aluminio en el marco del molde; (i) Inserto desmoldeado; (j) Colocar el inserto y el modelo en el marco del molde; (k) Colocar los canales conformables; (l) Colada de epoxi con partículas de aluminio dentro del marco del molde; (m) Inserto desmoldeado; (n) Eliminación de los canales conformables; (o) Molde de resina epoxi-aluminio con canales de enfriamiento conformables; (p) Post-tratamiento térmico del molde [175].

Igualmente, Vaezi et al. [180] estudiaron la fabricación de modelos de cera de álabes de turbinas mediante moldes de silicona, de epoxi y mediante el método convencional. Se observó una reducción relevante en los tiempos y costes de fabricación de moldes entre las dos técnicas IST y el método tradicional, tal y como se muestra en la Tabla 2.14. En esta investigación, también se analizó la precisión dimensional de los modelos de cera moldeados. Los modelos obtenidos con moldes epoxi tuvieron una desviación máxima de $-0,282$ mm, mientras que los obtenidos con un molde de silicona tuvieron $-0,402$ mm. Por lo tanto, y de acuerdo con la desviación dimensional máxima permisible, se concluyó que los moldes epoxi eran más apropiados que los de silicona para la producción de modelos de cera de álabes.

Tabla 2.14 Comparativa de coste y tiempo de fabricación para la fabricación de modelos de cera mediante diferentes técnicas [180].

	<i>Epoxy tooling</i>	Moldes de silicona	Utillaje convencional
Tiempo (días)	13	10	30
Coste (dólares)	1.500	800	2.100

2.5.2.3 Conformado en frío de metales de bajo límite elástico

El acero y la fundición de hierro se utilizan con frecuencia para fabricar troqueles que se emplean para la producción en masa de chapa conformada [181,182]. Hoy en día, también existen otras alternativas para la fabricación de matrices de conformado de chapa mediante colada de aleaciones de bajo punto de fusión [183,184], electroformado [185] y *thermal plasma spray coating* [186]. Sin embargo, algunas de las desventajas más apreciables de estos métodos contemplan una inversión elevada en equipos, el alto coste de funcionamiento de éstos y el tiempo de fabricación de la matriz o estampa [187].

En este contexto, Kuo y Li [188] propusieron un método rápido para fabricar troqueles de epoxi, tal y como se muestra en la Figura 2.25. Mediante estos troqueles se pueden producir pequeños lotes de componentes de chapa de aleaciones ligeras. Este estudio reveló que se puede obtener una reducción del 87,2 % en los costes de fabricación del troquel en comparación con el método convencional. Además, el troquel se fabricó en un día.

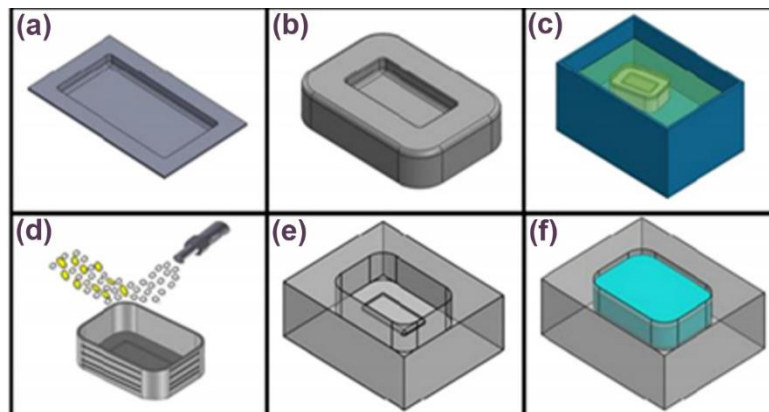


Figura 2.25 Esquema de la fabricación de troqueles de conformado de chapa: (a) Diseño del modelo; (b) Fabricación del modelo; (c) Eliminación de los materiales soporte de los prototipos; (d) Tratamiento superficial del prototipo mediante chorro de arena; (e) Fabricación del molde de silicona; (f) Fabricación de troqueles de conformado de chapa [188].

Posteriormente, Kuo y Li [187] lograron mejorar el rendimiento del troquel epoxi anteriormente mencionado. Mediante la adición de zirconia a la resina epoxi, lograron aumentar la dureza y con ello la resistencia al desgaste del troquel. Esto se demostró experimentalmente midiendo el

desgaste de las esquinas del troquel en función de las muestras conformadas, tal y como se muestra en la Figura 2.26.

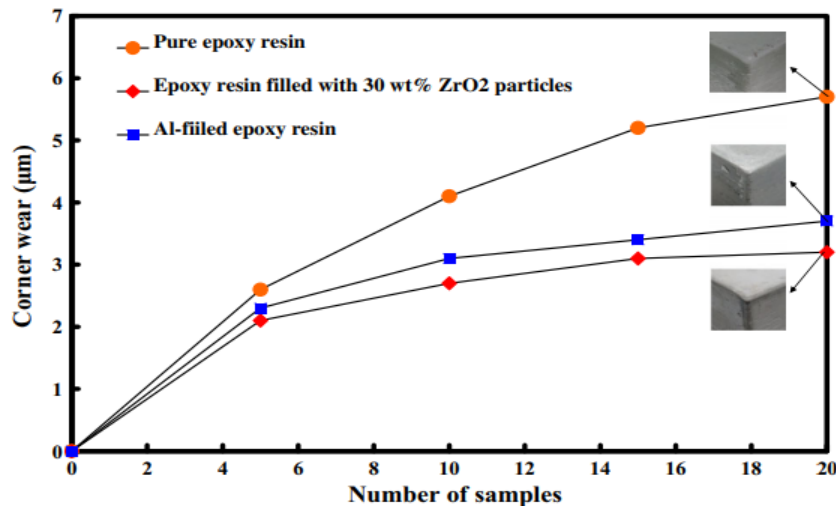


Figura 2.26 Desgaste de las esquinas de los troqueles de conformado de chapa por cada muestra conformada [187].

2.5.2.4 Conformado en caliente

El proceso de conformado en caliente es un proceso de fabricación ampliamente utilizado para fabricar productos de bienes consumo [189]. Se han realizado investigaciones en las que se han desarrollado moldes para conformado en caliente mediante resina epoxi para conformar lotes reducidos de producción. Por ejemplo, Kuo y Chen [189] y Kuo y Lyu [190] presentaron un método para fabricar moldes de conformado en caliente mediante resina epoxi cargada con partículas de aluminio, siguiendo el método de la Figura 2.27. Asimismo, Kuo y Chiang [191,192] investigaron el efecto que los marcos exteriores del molde (fabricados con diferentes materiales) poseen en el tiempo de ciclo del proceso de conformado en caliente. Igualmente, Kuo y Wang [193,194] propusieron una tecnología de modificación de la superficie de conformación mediante plasma, para lograr fabricar un micro-molde de conformado en caliente con un elevado acabado superficial.

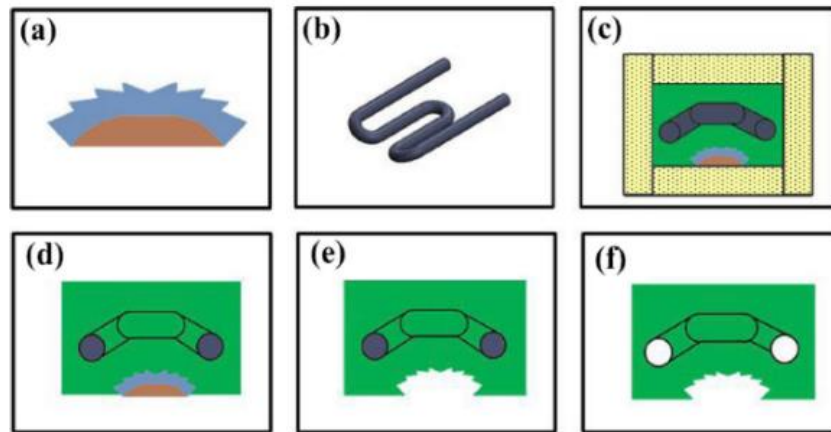


Figura 2.27 Esquema de fabricación de moldes para conformado en caliente: (a) Modelo; (b) Diseño de canales de refrigeración; (c) Verter resina epoxi cargada con aluminio; (d) Retirar el marco del molde; (e) Eliminación del modelo; (f) Eliminación de los canales de refrigeración [189].

2.5.2.5 Moldeo por inyección de silicona líquida

La gran procesabilidad y las ventajas en la fabricación de piezas complejas que posee el moldeo por inyección de silicona líquida o *liquid silicone rubber injection molding* (LSRIM), hacen de esta técnica una excelente alternativa para su uso en muchas industrias [195]. La construcción típica de moldes de acero inoxidable necesita un tiempo relativamente largo. Además, las técnicas de fabricación aditiva metálica no son una alternativa atractiva debido a sus elevados costes de producción. Por lo tanto, para acortar el ciclo de desarrollo del producto, Kuo y Lin [196] desarrollaron un método rentable para la fabricación rápida de moldes epoxi para LSRIM. En esta investigación, se obtuvieron las propiedades mecánicas y térmicas de diferentes composiciones de epoxi con carga de aluminio. Se seleccionó la composición óptima para fabricar un molde LSRIM de epoxi para luego compararlo con un molde fabricado mediante métodos convencionales. El estudio demostró la viabilidad del molde epoxi en el proceso LSRIM. Además, obtuvieron que la durabilidad del molde de inyección de LSRIM fabricado con el compuesto desarrollado fue similar (en un contexto de fabricación de serie larga) respecto del que fue fabricado mediante métodos convencionales.

2.5.3 Influencia de los canales de enfriamiento en el tiempo de ciclo

Las técnicas RT también pueden referirse a la fabricación de moldes funcionales con canales de refrigeración conformables o *conformal cooling channels* (CCC) integrados [197,198]. Esta tipología de canal sigue el contorno de la superficie de la pieza a moldear y tiene por objeto lograr un enfriamiento óptimo. En este sentido, los canales de refrigeración convencionales se mecanizan en línea recta, por lo tanto, no pueden proporcionar un enfriamiento uniforme en

toda la cavidad del molde. Ello conduce a un enfriamiento no uniforme y alabeo en las piezas moldeadas y tiempos de ciclo más largos [199,200]. Como resultado de ello, los CCC han demostrado ser más eficientes en comparación con los canales de enfriamiento convencionales en términos de productividad y precisión de piezas moldeadas [201,202].

La tubería de cobre [203], es ampliamente utilizada para fabricar canales de refrigeración e integrarlo en moldes epoxi. Sin embargo, solo se pueden elaborar geometrías relativamente simples debido a su limitada capacidad de doblado. De ahí la utilización de tecnologías como la deposición de hilo fundido (FDM), SLS, la fusión selectiva por láser (SLM), etc. Ya que éstas no presentan dicha limitación y como resultado de ello se mejora el mecanismo de transferencia de calor [204-207].

La influencia térmica que estos canales poseen en los moldes o utillajes diseñados se puede predecir o simular mediante el uso de herramientas informáticas como Ansys, Abaqus, Moldflow, C-Mold y Moldex-3D [201]. En este sentido, se han realizado numerosas simulaciones simulando el efecto de los CCC integrados en moldes [208-217] .

Asimismo, se han realizado estudios empíricos para conocer la influencia de los CCC en moldes epoxi. Por ejemplo, Kuo et al. [174] presentaron un caso de estudio sobre cómo los CCC afectan a los tiempos de enfriamiento del molde epoxi. En su investigación, analizaron tres tipos de diseños de canales de enfriamiento (Figura 2.28) integrados en moldes de inyección de cera. En comparación con los moldes de inyección de cera con y sin canales de enfriamiento convencionales, los tiempos de enfriamiento de los moldes de inyección de cera con CCC fueron un 50 % y 87 % más cortos, respectivamente.

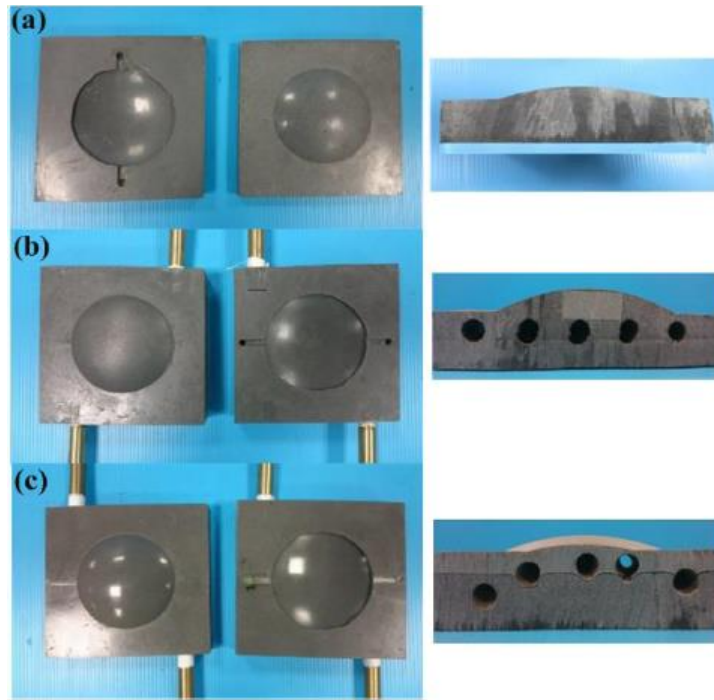


Figura 2.28 Moldes de epoxi para inyección de cera: (a) Sin canales de refrigeración; (b) Con canales de enfriamiento convencionales; (c) Con canales de enfriamiento conformables (CCC) [174].

Kuo y Chen [218] también corroboraron las ventajas de los CCC, cuando se utilizan en moldes de silicona para el moldeo por inyección de cera. De acuerdo con sus resultados experimentales (que tienen una buena correspondencia con los resultados de la simulación), los CCC embebidos en moldes de silicona (cargados con polvo de aluminio y grafito) reducen el tiempo de enfriamiento hasta en un 69,1 % en comparación con los moldes de silicona tradicional.

Con el objetivo de mejorar el rendimiento térmico de los moldes, Kuo et al. [219], desarrollaron una metodología para fabricar moldes epoxi para el proceso de inyección de cera con canales de enfriamiento de diferente sección transversal. Estos *profiled conformal cooling channels* (PCCC) proporcionan un enfriamiento uniforme y reducen la tensión residual de las piezas moldeadas, lo que resulta en una mejor precisión dimensional de éstas, tal como Liu et al. también concluyó [220]. Altaf et al. [221], también integró dichos PCCC en moldes epoxi, logrando una reducción del 18% en el tiempo de ciclo (y un aumento del flujo de calor del 14,6 %) en comparación con moldes epoxi con CCC.

Igualmente, Kuo CC et al. [219], desarrollaron otra técnica para reducir el enfriamiento de los moldes epoxi. Este enfoque se basa en disminuir la rugosidad de la superficie de los CCC construidos con la tecnología FDM mediante el uso de acetona. Kuo et al. [174], también

obtuvieron resultados similares cuando estos canales de enfriamiento fueron tratados con vapor de agua. Así pues, concluyeron que ambos métodos propuestos tenían una mejor calidad superficial que los CCC fabricados con técnicas como SLS [222], SLM [223] y la técnica *diffusion bonding technology* [224,225].

Otro método para mejorar la conductividad térmica de los moldes epoxi y con ello lograr una reducción del tiempo de ciclo de moldeo fue desarrollado por Altaf y Rani [226]. Éstos, propusieron embeber en el molde epoxi un inserto de aluminio, en una posición cercana a la superficie de moldeo. Mediante este procedimiento, el tiempo de enfriamiento se redujo en un 56 %.

2.5.4 Efecto de la adición cargas en las propiedades de la resina epoxi

Mejorar las propiedades de la resina epoxi es especialmente importante, ya que aumenta las prestaciones de los moldes. Para ello, se añaden cargas metálicas y no metálicas como por ejemplo cobre, latón, grafito y carburo de silicio a la matriz epoxi para modificar sus propiedades mecánicas (Tabla 2.15), físicas (Tabla 2.16) y térmicas (Tabla 2.17).

Tabla 2.15 Adición de partículas y sus efectos sobre las propiedades mecánicas de la resina epoxi.

Propiedad	Efecto	Ref.
Resistencia a compresión	Las nanopartículas de sílice y el caucho estireno-butadieno mejoran la resistencia a la compresión de la resina epoxi	[227]
	La resistencia a la compresión de la resina epoxi aumenta con la adición de cargas como: Si ₃ N ₄ , Al, Al ₂ O ₃ , grafito, SiC, Cu y yeso. Sin embargo, ésta, se reduce con los siguientes agregados: Al ₂ O ₃ y grafito por encima del 20 % en peso; Al y yeso por encima del 25 % en peso; y SiC, Cu y Si ₃ N ₄ por encima del 35 % en peso.	[228]
Resistencia a tracción	La resistencia a la tracción de la resina epoxi disminuye con el aumento del contenido de partículas o cargas. De hecho, la resistencia es menor incluso que la de la propia resina epoxi sin carga.	[228]
Módulo a tracción	La adición de cargas en la matriz epoxi aumenta su módulo de tracción	[228]
Resistencia a impacto	Las cargas de dióxido de titanio y silicato de calcio mejoran la resistencia al impacto de la resina epoxi.	[229]
	Las partículas polititanato de potasio aumentan la resistencia al impacto de la matriz epoxi.	[230,231]

Tabla 2.16 Adición de partículas y sus efectos sobre las propiedades físicas de la resina epoxi.

<i>Propiedad</i>	<i>Efecto</i>	<i>Ref.</i>
Dureza	La adición de cargas metálicas a la resina epoxi mejora la dureza y la resistencia al desgaste. La dureza está relacionada con la resistencia al desgaste.	[232,233]
Densidad	La dureza aumenta con el contenido de carga. Sin embargo, si la carga es más blanda que la matriz, la dureza disminuye.	[234,235]
	La densidad de la resina epoxi aumenta linealmente con el contenido de carga.	[232,235]
Resistencia al desgaste	La adición de fibras de vidrio y carbono molidas a la resina epoxi mejora su resistencia al desgaste.	[232]
	La adición de contenidos de carga (Si_3N_4 , Al, Al_2O_3 y yeso) entre el 20 % y el 30 % en peso en la resina epoxi, producen compuestos con el mejor comportamiento al desgaste. De entre estas cargas, Al_2O_3 y Si_3N_4 proporcionan el mejor comportamiento al desgaste.	[154]
	La adición de un 30 % en peso de partículas de ZrO_2 en la matriz epoxi mejora el rendimiento de desgaste del epoxi sin carga (un 44 %). La mejora de la resistencia al desgaste prolonga la vida útil del molde.	[159]

Tabla 2.17 Adición de partículas y sus efectos sobre las propiedades térmicas de la resina epoxi.

<i>Propiedad</i>	<i>Efecto</i>	<i>Ref.</i>
Conductividad térmica	Añadir cargas metálicas como el aluminio, cobre y latón aumentan la conductividad térmica de la resina epoxi.	[236,237]
	Añadir partículas de Al_2O_3 , BN y SiC en la resina epoxi mejoran su conductividad térmica.	[238,239]
Expansión térmica	A mayor contenido de partículas de Si_3N_4 , Al, Al_2O_3 y yeso en la resina epoxi menor coeficiente de expansión térmica lineal.	[154]

2.5.5 Reutilización de residuos para la construcción de moldes epoxi sostenibles

La preocupación y al mismo tiempo el reto que la sociedad afronta en torno a la generación y eliminación de residuos es capital, a lo que se le une que cada vez es más difícil encontrar vertederos con instalaciones apropiadas. Además, el coste del vertido de desechos se va incrementando progresivamente con el paso de los años [240].

Éste es un problema fundamentalmente asociado al primer mundo, ya que la tasa de generación de residuos en los países más desarrollados es mucho más elevada en comparación con los menos desarrollados. En este sentido, se advierten diferencias considerables en la generación de residuos per cápita entre Europa y EE.UU. con países menos desarrollados como Vietnam Tailandia y Camboya [36,39].

En un esfuerzo por minimizar la cantidad de residuos producidos, la filosofía ZWM aboga por la producción de piezas a través de sistemas de fabricación que produzcan menos desperdicios [241]. Una forma de promover esta sistemática ZWM es a través de la fabricación sostenible, que se basa en la aplicación de las 6 R-s, es decir, en reducir, reutilizar, reciclar, recuperar, rediseñar y remanufacturar [242,243].

En este contexto, las resinas epoxi se presentan como materiales con amplia capacidad para incorporar residuos [244]. De hecho, la encapsulación de residuos constituye hoy en día un nicho de mercado emergente para los compuestos de matriz polimérica [245], por ejemplo, se han utilizado con éxito numerosos residuos industriales a modo de carga en matrices termoestables [246-251].

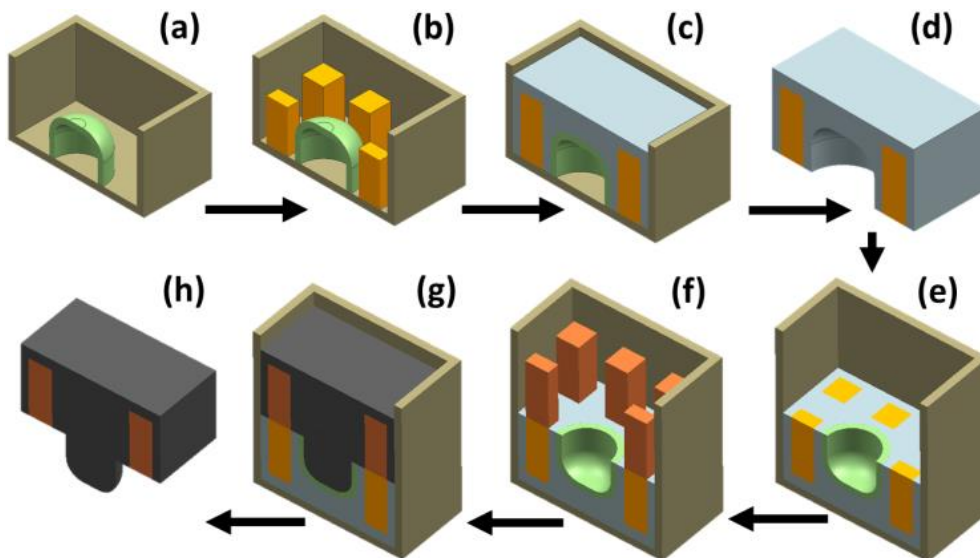


Figura 2.29 Procedimiento para la fabricación de *green epoxy moulds*: (a) Colocación del modelo de impresión 3D en el marco del molde; (b) y (f) Introducir piezas de epoxi obsoletas dentro del marco del molde; (c) y (g) Verter compuesto epoxi; (d) Cavity desmoldeada; (e) Colocación de la cavidad en el marco del molde; (h) Núcleo desmoldeado. Adaptado de Kuo y Kuo et al [252,253].

Concretamente, en el ámbito de la técnica *epoxy tooling*, se han realizado diversas investigaciones centrándose en la reutilización de residuos basados en compuestos de resina epoxi con carga de aluminio. Por ejemplo, Kuo [252] y Kuo et al. [253] desarrollaron una técnica que se basa en colocar piezas de epoxi obsoletas dentro del marco de colada, para posteriormente cubrirlas con resina epoxi virgen, tal y como se muestra en la Figura 2.29.

Como resultado de esta metodología de fabricación se obtienen unos costes reducidos (en esta investigación, se logró un ahorro del 52,5% en concepto de materia prima virgen) y una alta tasa de producción de moldes. Asimismo, esta sistemática está alineada con la fabricación sostenible

a través del método de reutilización. Este enfoque (Figura 2.30) consiste en reutilizar el producto al final de su vida, sin destruirlo [254].

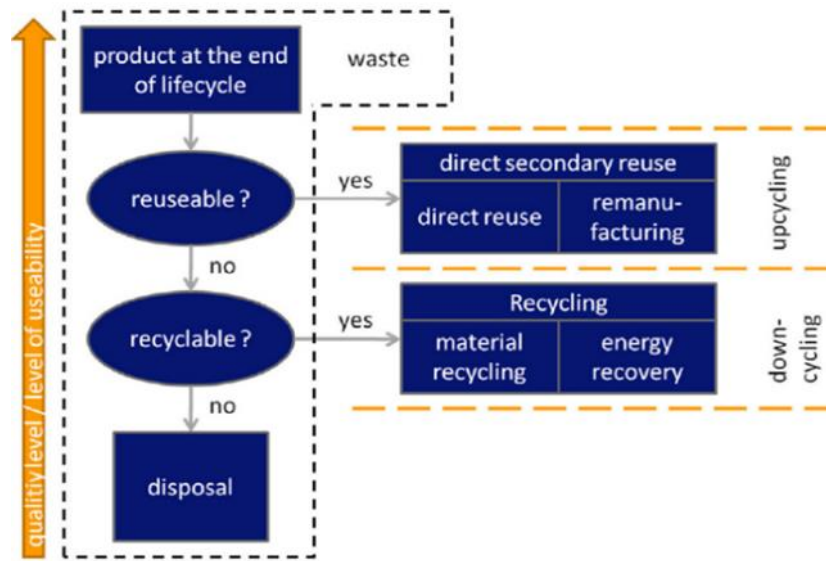


Figura 2.30 Alternativas sugeridas de un producto al final de su ciclo de vida [254].

Otra técnica sostenible para fabricar moldes se basa en moler moldes o piezas epoxi obsoletas, para obtener un compuesto granulado y éste mezclarlo con resina epoxi. Finalmente, para elaborar el molde, se realiza una colada con este compuesto (Figura 2.31). Kuo et al [174,175] y Kuo y Chen [189] desarrollaron este método. Por ejemplo, Kuo et al [174] emplearon esta técnica para fabricar un molde con objeto de fabricar modelos de cera por inyección, e indicaron que se logró un ahorro de costes en materia prima del 63 % respecto del método de fabricación homólogo no sostenible.

Además, Kuo et al [255] también desarrollaron un CCC sostenible para moldes epoxi mediante fabricación aditiva y filamento de polivinil butiral. En este trabajo se muestran los mejores parámetros de proceso para fabricar este filamento de cera y el método para eliminarlo.

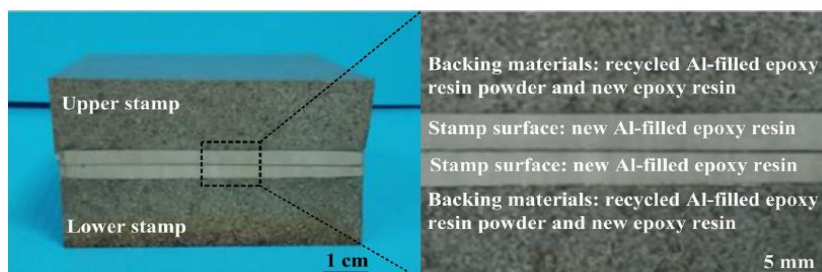


Figura 2.31 Molde para conformado en caliente, fabricado con epoxi cargado con triturado epoxi-aluminio [189].

2.5.6 Industria 4.0

La Industria 4.0 hace hincapié en la automatización y en la inteligencia aplicada a la tecnología de fabricación, donde los moldes y utillajes son un aspecto esencial. El primer requisito de un molde inteligente comprende el uso de diferentes tipos de sensores para monitorizar diversas variables físicas, que indican el estado del molde y las interacciones entre dicho molde y la pieza [256].

En este sentido, se han realizado muchas investigaciones para monitorizar moldes. Kim et al. [257] estudiaron las causas de los defectos de piezas moldeadas monitorizando el proceso de fabricación de moldeo por transferencia de resina. Ageyeva et al. [258] investigaron y analizaron los sistemas de sensorización disponibles para aplicarse en procesos de moldeo y medir las variables como por ejemplo presión, viscosidad, temperatura, etc.

Asimismo, Griffiths y Leigh [259] desarrollaron la idea de imprimir un termoplástico conductor y otro no conductor para formar sensores interdigitales e introducirlos dentro del molde, para monitorizar el curado de un polímero termoestable.

Kuo y Chen [260] desarrollaron un sistema de monitoreo inteligente para moldes de silicona en el moldeo por inyección de cera a baja presión, mediante el seguimiento de seis parámetros de proceso a lo largo del tiempo.

Así pues, la sensorización y con ello la monitorización de las variables de proceso proporcionan información sobre el sistema físico, mientras que las tecnologías inteligentes recopilan y procesan los datos registrados por los sensores a modo de retroalimentación del proceso de producción [261,262].

Dicha sensorización, monitorización y tecnologías inteligentes, conducen al segundo requisito, que es el diseño de moldes que se comunican para fusionar el mundo real y el virtual y crear un sistema ciber-físico (Figura 2.32).

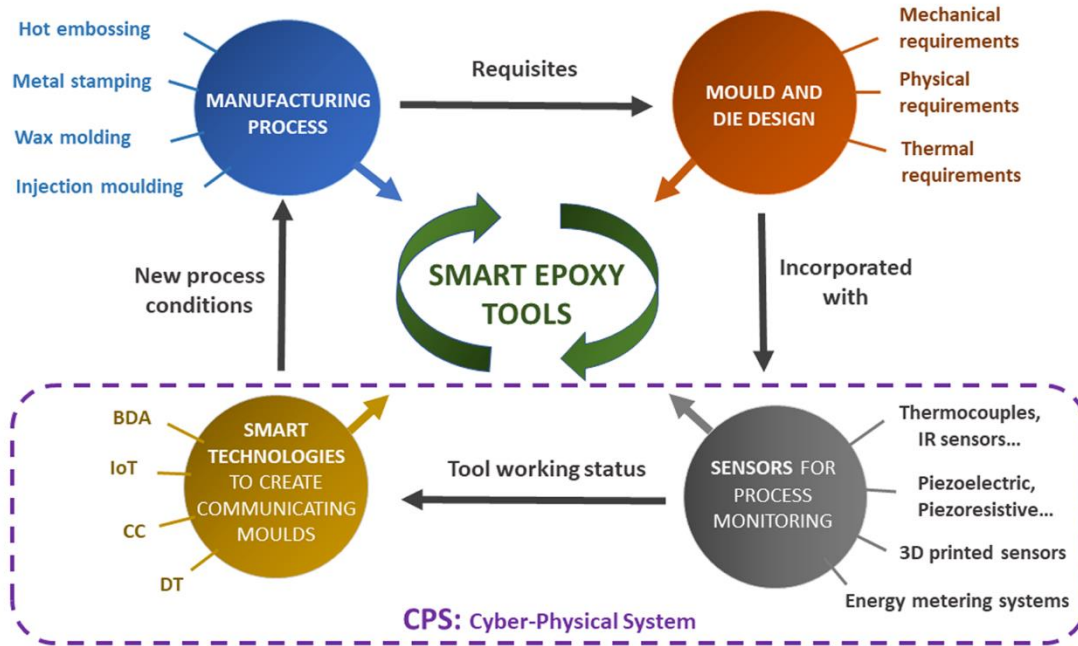


Figura 2.32 Esquema de un ecosistema necesario para alimentar moldes de epoxi inteligentes.

En este sentido, se han realizado numerosos estudios en el campo de las ya conocidas tecnologías inteligentes: Internet de las cosas (IoT), *Cloud Computing* (CC), *Big Data Analytics* (BDA), *Cyber-Physical Systems* (CPS) y *Digital Twins* (DT). Por ejemplo, Noor [263] implementó la tecnología BDA en el desarrollo de fábricas inteligentes para la administración de información de multitud de fuentes de datos. Prabhu [264] desarrolló un CPS para la asociación de la acción del dispositivo con la identificación del evento y la hora. Liu y Jiang [265] propusieron una guía para construir un sistema CPS que engloba la interconexión con los diferentes *hardwares*, la adquisición de datos, su gestión, procesamiento y visualización, así como toma de decisiones y aprendizaje.

Asimismo, se han aplicado tecnologías BDA, CPS y DT para mejorar la eficiencia energética de los procesos de fabricación. Por ejemplo, Wang et al. [266] crearon una novedosa arquitectura basada en las tecnologías CPS y BDA que es capaz de monitorizar, evaluar y optimizar los procesos de mecanizado con objeto de reducir el consumo de las máquinas de mecanizado por arranque de viruta.

Igualmente, Liang et al. [267] utilizaron estas técnicas CPS y BDA, así como algoritmos de aprendizaje inteligente para desarrollar un modelo energético capaz de programar, monitorizar, aprender y reprogramar. Según los resultados obtenidos, las empresas ahorraron aproximadamente un 40 % de energía y aumentaron su productividad en un 30 %.

En cuanto a la aplicación de Gemelos Digitales (DT) para la mejora de la eficiencia energética, Hauf et al. [268] desarrollaron un DT para reproducir el consumo energético de un sistema automático de fabricación, y mediante el uso de aplicaciones del tipo *Functional Mock-up Units* se realizaron simulaciones para la optimización del consumo de energía. En la misma línea, Kannan y Arunachalam [269] aumentaron la eficiencia energética en un 14 % con la implementación de DT.

Es destacable la amplia investigación realizada en el ámbito de la eficiencia energética aplicada a los procesos de mecanizado por arranque de viruta. En este sentido, se han conseguido ahorros energéticos sustanciales, ya sea mediante la aplicación de nuevos modelos energéticos [270-272] o mediante la utilización de algoritmos de optimización [273-276].

En cualquier caso, en la mayoría de las investigaciones se señala la importancia de una precisa medición de los flujos de energía, como medio para lograr una eficaz retroalimentación energética. En este sentido, Gahm et al. [277] estudiaron los numerosos sistemas de medición de energía aplicables a las empresas manufactureras.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Este capítulo se desglosa en varias partes. Primeramente, se describen los materiales utilizados. En segundo lugar, se describen las técnicas experimentales empleadas. Finalmente, se muestra la estrategia de diseño (y simulaciones térmicas), fabricación de moldes y pruebas de moldeo realizadas, así como un ejemplo de aplicación.

3.1 MATERIALES

3.1.1 Materias primas

3.1.1.1 Partículas de GSS

Las microvirutas de acero (GSS) se recogieron de una sierra de cinta (Figura 3.1) y éstas fueron suministradas por la empresa de transformación de SMC, Composites Martiartu S.L. Se tamizó una muestra de 400 g con cuatro tamices analíticos de 200 mm de diámetro con diferente malla (Labopolis S.L.) y la granulometría obtenida se muestra en la Figura 3.2. Su densidad es de 7,85 g/cm³.



Figura 3.1 Sierra de cinta (izquierda); microviruta de acero (derecha).

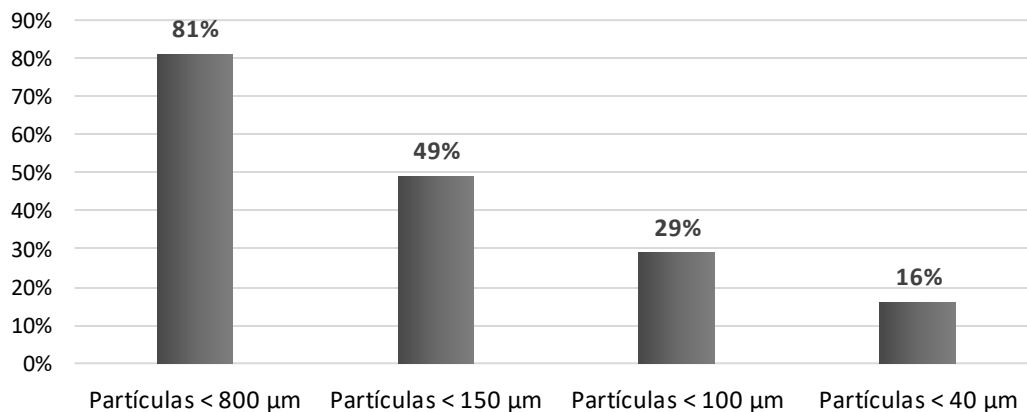


Figura 3.2 Granulometría de la muestra de GSS.

3.1.1.2 Partículas de aluminio

El polvo de aluminio (Figura 3.3) se adquirió a Ferroca S.A. y muestra la granulometría indicada en la Figura 3.4. Su densidad es de 2,70 g/cm³.



Figura 3.3 Partículas de aluminio.

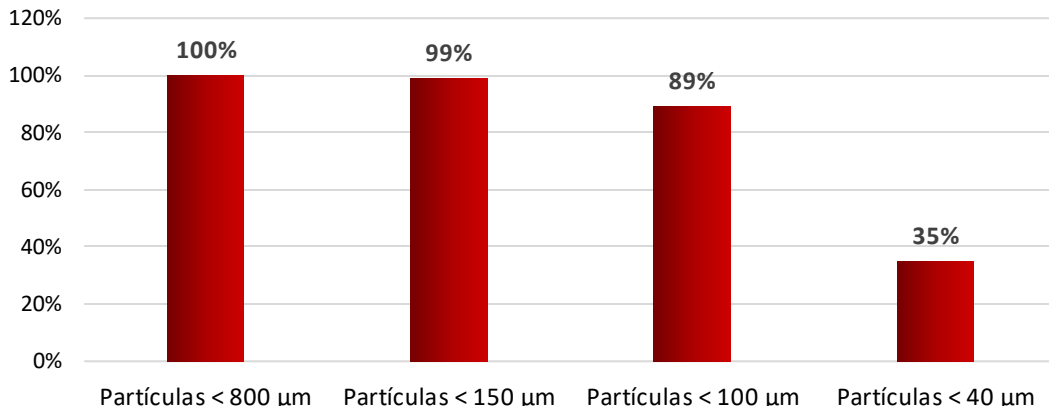


Figura 3.4 Granulometría de la muestra de aluminio.

3.1.1.3 Partículas de carbonato de calcio

El polvo de CaCO₃ (Figura 3.5) se adquirió a Jesus Suministros S.A. y muestra la granulometría indicada en la Figura 3.6. Su densidad es de 2,71 g/cm³.



Figura 3.5 Partículas de CaCO₃.

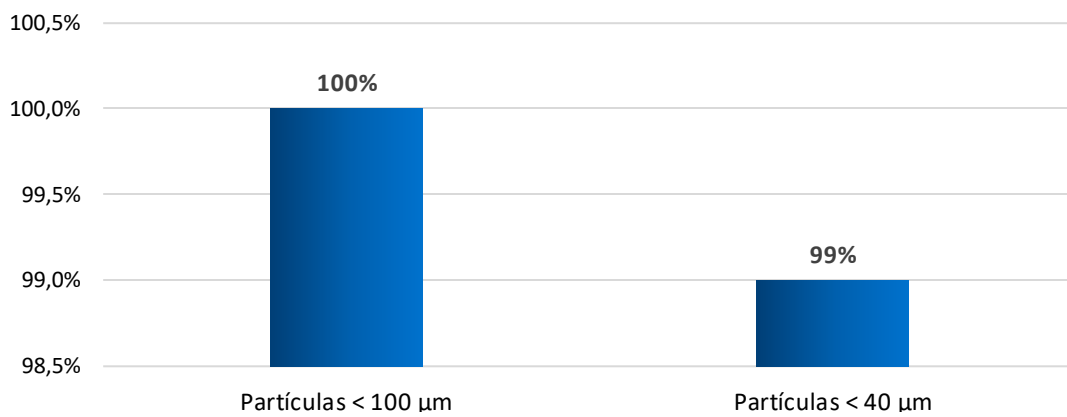


Figura 3.6 Granulometría de la muestra de CaCO₃.

3.1.1.4 Partículas de SMC

El polvo de SMC (Figura 3.7) se recogió de los residuos generados por el fresado de piezas de SMC y fue suministrado por la empresa Composites Martiartu S.L. El SMC empleado (Verkid PG18-G250 1015; Astar S.A.) tiene un gramaje de 4.500 gr/m² y un contenido de fibra de vidrio del 18 % en peso (*mat* de fibra). Su granulometría viene recogida en la Figura 3.8, y su densidad es de 1,82 g/cm³.



Figura 3.7 fresadora (izquierda); polvo de SMC (derecha).

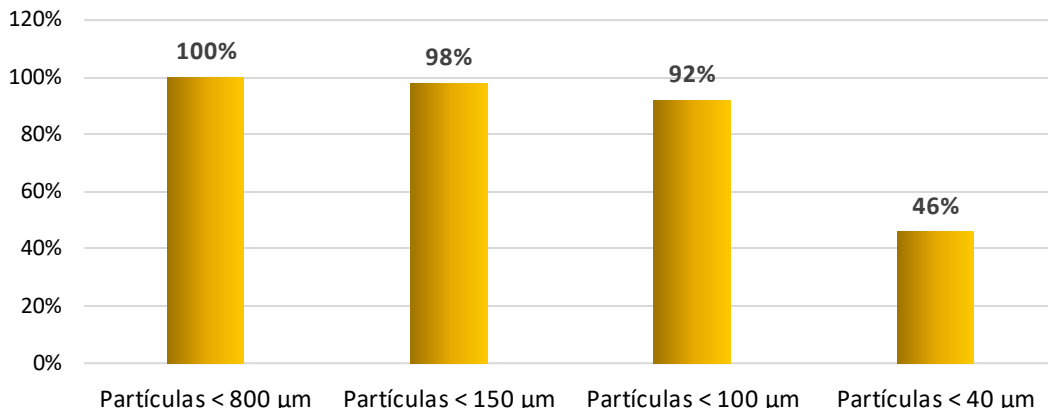


Figura 3.8 Granulometría de la muestra de SMC.

3.1.1.5 Matriz epoxídica

Se eligió el sistema de resina y endurecedor, Uneresin 3710 AF (1,17-1,18 g/cm³ y 6.500-8.000 mPa s) y Unedur 3711 AF (0,92 g/cm³ y 30-50 mPa s), resina y endurecedor, respectivamente, (Uneco S.A.) debido a su alta T_g después del post-curado (135 °C-142 °C para un ciclo de curado de 15 minutos a 100 °C + 1 hora a 160 °C). La relación de mezcla de resina y endurecedor (en peso) es de 100:27 y su viscosidad se sitúa entre 900-1200 mPa s y posee un tiempo de gelificación de 120-150 minutos a temperatura ambiente.

3.1.1.6 Aditivo anti-sedimentación

Para lograr un aumento considerable de la viscosidad de la mezcla resina-endurecedor en el rango de velocidades bajas de cizalla, se utilizó un aditivo reológico en polvo basado en filosilicatos organofílicos, denominado Garamite-7305 (BYK-Chemie, GmbH). Este aditivo presenta una densidad aparente y densidad específica de 130 kg/m³ y 1,5-1,7 g/cm³, respectivamente.

3.1.2 Procesado de materiales compuestos

Tanto las cargas comerciales (carbonato de cálcico y aluminio) como las cargas residuales (GSS y polvo de SMC) se introdujeron en un horno de convección (AFA 200/768; Dycometal S.L.), durante 1h a 105 °C para eliminar la humedad de éstas. Previamente (y con objeto de maximizar la cantidad de GSS en la resina), las GSS se tamizaron con el tamiz analítico de malla de 100 µm.

El proceso de fabricación de los compuestos fue el siguiente: se mezclaron 1.134,0 g de resina epoxi y 306,2 g de endurecedor con un agitador (SL-1; Lleal Process S.A.U.) a 120 rpm durante 5 minutos. Luego, se añadieron 60,0 g de Garamite a la resina catalizada, se mezclaron con el agitador a 120 rpm durante 3 minutos y se vertieron en cinco recipientes.

Posteriormente, se obtuvieron cuatro compuestos (y un quinto compuesto epoxi-endurecedor-garamite, sin partículas) vertiendo cuatro proporciones diferentes de GSS (10 %, 20 %, 30 % y 40 %) en peso, en la resina catalizada (como se muestra en la Tabla 3.1). Los tres días posteriores, se realizó la misma metodología para fabricar los compuestos cargados con partículas de aluminio, carbonato de cálcico y SMC.

Cada compuesto se mezcló manualmente con un agitador durante 5 minutos, se introdujo en la cámara de vacío durante 20 minutos (salvo los compuestos de SMC y CaCO_3) y se vertió en quince moldes de madera rectangulares (previamente encerados con cera desmoldeante MoldWiz, suministrada por Axel ApS) y en cinco moldes de silicona (Xiameter RTV -4136-M; Dow Corp.) con una cavidad cilíndrica.

Los moldes se introdujeron en el horno de convección a 40 °C con una rampa de temperatura ascendente de 20 °C/h hasta alcanzar una temperatura de 160 °C (que se mantuvo durante 1h). Finalmente, se bajó la temperatura con una rampa descendente de 20 °C/h hasta alcanzar la temperatura ambiente y se desmoldearon las muestras.

Tabla 3.1 Relaciones de mezcla de los materiales compuestos producidos.

Compuesto	Contenido de epoxi (EP) (% en peso)	Contenido de endurecedor (% en peso)	Contenido de Garamite (GA) (% en peso)	Tipo de carga	Contenido de carga (% en peso)
EP	78,75	21,26	-	-	-
10GSS/4GA/EP	68,03	18,37	3,60	GSS	10,00
20GSS/4GA/EP	60,47	16,33	3,20	GSS	20,00
30GSS/4GA/EP	52,91	14,29	2,80	GSS	30,00
40GSS/4GA/EP	45,4	12,25	2,40	GSS	40,00
10AL/4GA/EP	68,03	18,37	3,60	AL	10,00
20AL/4GA/EP	60,47	16,33	3,20	AL	20,00
30AL/4GA/EP	52,91	14,29	2,80	AL	30,00
40AL/4GA/EP	45,40	12,25	2,40	AL	40,00
10GSS/2GA/EP	69,45	18,75	1,80	GSS	10,00
10SMC/4GA/EP	68,03	18,37	3,60	SMC	10,00
20SMC/4GA/EP	60,47	16,33	3,20	SMC	20,00
30SMC/4GA/EP	52,91	14,29	2,80	SMC	30,00
40SMC/4GA/EP	45,40	12,25	2,40	SMC	40,00
10 CaCO_3 /4GA/EP	68,03	18,37	3,60	CaCO_3	10,00
20 CaCO_3 /4GA/EP	60,47	16,33	3,20	CaCO_3	20,00
30 CaCO_3 /4GA/EP	52,91	14,29	2,80	CaCO_3	30,00
40 CaCO_3 /4GA/EP	45,40	12,25	2,40	CaCO_3	40,00

3.1.3 Análisis de costes y selección del compuesto

3.1.3.1 Análisis de costes de los compuestos

Se calculó el coste por kilogramo de los dieciséis compuestos, considerando la fracción de peso de cada constituyente (Tabla 3.1) y su coste (sistema de resina: 10,3 €/kg, polvo de aluminio: 6,5 €/kg, CaCO₃: 0,7 €/kg, SMC: 0 €/kg y GSS: 0 €/kg). Se descartó la contribución del aditivo reológico Garamite al coste total, debido a que únicamente se vierte una pequeña cantidad a la mezcla y que su precio no es excesivamente elevado (12,1€/kg).

Asimismo, la información de costes se utilizó para calcular el precio de la materia prima para construir tres tipos de moldes: un molde AL/EP, un molde GSS/EP y un molde SMC/EP con una barrera térmica de SMC/EP, todos ellos con un contenido de carga del 40 % en peso.

Además, se analizaron cuatro tamaños de molde: pequeño, de volumen 60 dm³ (5 x 5 x 2,5 dm³); medio, de 500 dm³ (10x10x5 dm³); grande, de 1700 dm³ (15 x 15 x 7,5 dm³); y muy grande 4000 dm³ (20 x 20 x 10 dm³).

3.1.3.2 Metodología de selección del compuesto

Se utilizó un método de selección analítico para ayudar con la selección de los compuestos más adecuados para su empleo en la fabricación de moldes [278]. Este método utiliza los resultados mecánicos, físicos y térmicos de la caracterización realizada. Al valor máximo se le designa la unidad y los índices relativos restantes se calculan dividiendo el valor a analizar por el valor máximo.

A continuación, los índices relativos se multiplican por un factor de ponderación (de 1 a 5: donde 1 se corresponde con muy poco importante y 5 se corresponde con extremadamente importante). Finalmente, el producto (índice relativo-factor de ponderación) de cada propiedad se suma o se resta con las demás características, dependiendo de si ésta es favorable o desfavorable para la presente aplicación. El valor más alto representa el compuesto más interesante y el valor más bajo, el menos interesante.

Las propiedades como la densidad, dureza y resistencia a la compresión se consideran de poca importancia, ya que la densidad solo afecta la manejabilidad del molde y la dureza y la resistencia a la compresión son aún menos relevantes, debido a que se coloca una funda de silicona entre la pieza y el molde, evitando así el desgaste del compuesto epoxídico.

La resistencia a la tracción y el módulo elástico de flexión se consideran de importancia moderada, debido a que cuanto menores son las propiedades mecánicas de los materiales, mayor es la cantidad de material que debe utilizarse para compensar esa merma de propiedades.

La conductividad térmica del molde se considera muy importante ya que tiene influencia en la calidad dimensional de las piezas a moldear [91], mientras que el coste del material se considera extremadamente importante, debido a que el coste del molde es uno de los aspectos fundamentales a abordar para reducir el coste por pieza en la producción de lotes pequeños. La conductividad térmica para la selección del compuesto no conductor térmico, se considera también extremadamente importante debido a que el aislamiento térmico es una característica del molde que necesita ser maximizada para reducir la disipación de calor al ambiente.

Cabe señalar que los factores de ponderación asociados a la densidad y al coste, pueden variar según el tamaño del molde. Por ejemplo, dichos factores pueden caer a 1 y 4, respectivamente, para moldes pequeños, debido a que el peso del molde pierde relevancia y los costes de mano de obra asociados a la fabricación del molde cobran relevancia en comparación con los costes de materia prima.

En la Tabla 3.2 se muestran los factores de ponderación asociados a cada característica ensayada.

Tabla 3.2 Factores de ponderación para cada propiedad.

Propiedad	Densidad (A)	Resistencia a tracción (B)	Módulo de flexión (C)	Resistencia a compresión (D)	Dureza (E)	Conductividad térmica (F)	Coste (G)	Valoración
Compuesto conductor térmico	2	3	3	2	2	4	5	$2(1-A)+3B+3C+2D+2E+4F+5(1-G)$
Compuesto no conductor térmico	2	3	3	2	2	5	5	$2(1-A)+3B+3C+D+E+5(1-F)+5(1-G)$

3.1.4 Materiales para la fabricación del molde

Para la fabricación de los moldes de compresión, se han utilizado no solamente dos de los compuestos desarrollados en este trabajo, sino también, filamentos de ácido poliláctico (PLA) de impresión 3D, silicona para colada, cera desmoldeante y tubería de cobre.

3.1.4.1 Filamentos de PLA/PHA

Los filamentos PLA/PHA *leaf/green* y PLA/PHA *standard white* de la empresa Colorfabb B.V., poseen un diámetro de 1,75mm, una densidad entre 1,24 g/cm³ y una Tg de 55 °C. Se recomienda una temperatura de impresión de 195 – 220 °C. Posee una resistencia a la tracción de 61,5 MPa y un módulo elástico de 2.960 MPa. Estos filamentos se han utilizado para fabricar los modelos sobre los que colar la silicona y los compuestos epoxídicos.

3.1.4.2 Silicona

La silicona Xiameter RTV 4136 M de la empresa Dow Corning utilizada es ampliamente utilizada para la colar de poliuretanos y otros plásticos. La mezcla base y agente de curado (mezclado 10:1), la mezcla posee una viscosidad de 90.000 mPa s, una densidad 1,29 g/cm³ y un tiempo de curado de 16 h a 25 °C. La silicona curada a temperatura ambiente durante 24 h posee una dureza Shore A de 59, resistencia a la tracción de 4,5 MPa, alargamiento a rotura 250 % y resistencia al desgarro de 16 KN/m.

3.1.4.3 Cera desmoldeante

Pasta desmoldeante MoldWiz de aplicación sobre multitud de superficies desarrollado para temperatura ambiente y hasta 60 °C, suministrado por Axel ApS. Su uso está especialmente dirigido para resinas poliéster, viniléster y epoxi.

3.1.4.4 Tubería de cobre

Se adquirió tubería de cobre en el Leroy Merlin de diámetro 15mm para fabricar el circuito de calentamiento del molde, que incluye tubos rectos y codos.

3.1.5 Materiales de moldeo

3.1.5.1 Preimpregnado viniléster-epoxi

El preimpregnado viniléster-epoxi (desarrollado en Gaiker) posee un refuerzo de vidrio biaxial $\pm 45^\circ$ de 800 g/m² y gramaje total de 1 235 g/m², densidad de 1,85 g/cm³, contenido en fibra de vidrio de entre 65-67 %.

3.1.5.2 Preimpregnado poliéster o SMC

El preimpregnado poliéster isoftálico (suministrado por Astar) y denominado Verkid PG18-G250 1015 posee un refuerzo de *mat* de fibra de vidrio. El compuesto posee una masa superficial de 4,5 kg/m² y un contenido de fibra de vidrio del 18 % en peso.

3.2 TÉCNICAS EXPERIMENTALES

3.2.1 Caracterización morfológica y analítica

3.2.1.1 Análisis SEM-EDX

El microscopio SEM (Figura 3.9) que se ha utilizado es un microscopio electrónico de barrido de la casa ZEISS (modelo EVO50) con un detector de rayos X acoplado de la marca OXFORD. El microscopio dispone de un detector de electrones secundarios que da una idea de la estructura superficial de la muestra y un detector de electrones dispersados, que da información de las diferentes fases presentes en las muestras.

Para poder analizar la muestra sin problemas de cargas electrostáticas, la muestra debe de ser conductora, por lo que es necesario metalizarla. Esto se realizó mediante un recubrimiento metálico de una aleación de oro y paladio (80/20 % en peso), que se ha depositado superficialmente con un equipo de *Sputtering* Leica EM SCD 005 (Figura 3.9) realizando un vacío previo para llevar a cabo el proceso, con 30 s de tiempo de ciclo y 30 mA de intensidad se consigue una capa metálica de 5-10 nm.

Todas las observaciones se realizaron en alto vacío con un voltaje de 20 kV.



Figura 3.9 Microscopio de barrido SEM-EDX y equipo de *Sputtering*.

3.2.1.1.1 Materias primas

Se analizó una muestra de GSS (tras tamizarla con un tamiz de 100 micras) y de SMC mediante microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (SEM-EDX), para obtener la naturaleza y morfología de ambos materiales.

Para conocer únicamente la morfología de las partículas de aluminio y carbonato de calcio, se realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM).

3.2.1.1.2 Compuestos con 40 % en peso de carga

Se realizaron observaciones SEM de los compuestos 40GSS/4GA/EP, 40AL/4GA/EP, 40SMC/4GA/EP y 40CaCO₃/4GA/EP para identificar la presencia de burbujas y la distribución de las cargas. Las probetas (de dimensiones 5 x 10 x 3 mm) se extrajeron de unos prismas de 100 x 10 x 3 mm, mecanizados con la sierra de precisión (Isomet; Tecnomet S.L.). A su vez, dichos prismas se extrajeron de unas muestras de 200 x 50 x 3 mm mediante la sierra circular (49716 meppen; Metabo, S.A.). Las probetas se metalizaron.

3.2.1.1.3 Sedimentación de la carga GSS

Se analizaron los compuestos: 10GSS/4GA/EP y 10GSS/2GA/EP, para analizar la sedimentación de la carga GSS en función de la cantidad de Garamite añadida. Las probetas (de dimensiones 5 x 10 x 3 mm) se obtuvieron siguiendo el mismo procedimiento indicado para las observaciones SEM anteriores. Ambas muestras se metalizaron.

3.2.1.2 Ensayo de densidad

Se utilizó una balanza analítica (Mettler AE260 Delta Range; Mettler Toledo Inc) para realizar los ensayos de densidad (ISO 1183-1). Se utilizó el método de inmersión con alcohol isopropílico como líquido de inmersión. Las probetas de densidad de dimensiones 20 x 20 x 3,5 mm se extrajeron de una muestra de 200 x 100 x 3,5 mm mediante mecanizado con sierra circular (49716 meppen; Metabo, S.A.).

Con los cinco resultados obtenidos (epoxi sin carga y epoxi con cuatro diferentes porcentajes de carga) de las pruebas de densidad y cálculos teóricos, se obtuvieron las ecuaciones de sus líneas de tendencia para cada una de las cuatro familias de compuesto. Las ecuaciones se calcularon utilizando Microsoft Excel y la función polinomial de segundo orden fue la que mejor se ajustó a los resultados. Las densidades teóricas de los compuestos se obtuvieron mediante la regla de

mezclas [235], es decir, mediante la ecuación (1), mientras que el porcentaje de huecos se calculó mediante la ecuación (2), donde d representa la densidad, V representa la fracción de volumen y los subíndices v , C , f , m y C_{test} representan los huecos, el compuesto, la carga, la matriz y el compuesto ensayado [279].

$$d_c = d_m V_m + d_f V_f \quad (1)$$

$$V_v = (d_c - d_{\text{ctest}}) / d_c \quad (2)$$

3.2.2 Caracterización térmica de los compuestos

3.2.2.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

3.2.2.1.1 Análisis de la T_g

Las muestras se introdujeron en el DSC (DSC1; Mettler Toledo Inc.), para obtener la T_g . Se calentaron hasta 250 °C desde -50 °C a una velocidad de 10 °C min⁻¹ en atmósfera de nitrógeno. La T_g se calculó a partir del primer barrido de calentamiento. Se obtuvieron tres pendientes y dos puntos de intersección. El punto medio entre estos dos puntos de intersección se tomó como el valor de T_g . Se extrajeron de las muestras 12,19 mg, 22,40 mg y 17,83 mg de limaduras de 40GSS/4GA/EP, de 40AL/4GA/EP y de epoxi sin carga, respectivamente. Las limaduras se extrajeron de tres muestras de 200 x 50 x 3 mm.

3.2.2.1.2 Análisis de la conductividad térmica

Se realizó un análisis DSC para obtener la conductividad térmica de la resina epoxi sin carga y de los dieciséis compuestos creados. El método consistió en colocar galio en la superficie del extremo circular superior de la muestra. La conductividad térmica de la muestra se calcula a partir de la diferencia de temperatura y el flujo de calor entre las superficies de los extremos superior e inferior del disco. La conductividad térmica ($\lambda = W / mK$) se calculó con la ecuación (3) [280]:

$$\lambda = \phi / \Delta T + h / A \quad (3)$$

donde, ϕ representa el flujo de calor (W), ΔT representa la diferencia de temperatura (K), h el espesor de la muestra (mm) y A el área de la sección transversal (mm²).

Se utilizaron muestras cilíndricas de 6 mm de diámetro por 30 mm de largo fabricadas con el molde de silicona (Figura 3.10), se cortaron en rodajas de 1,0-1,5 mm de espesor mediante la

sierra de precisión de laboratorio (Isomet; Tecnomet S.L.), y éstas se introdujeron en el equipo de conductividad térmica.

3.2.2.1.3 Metodología de fabricación de moldes de silicona

El procedimiento de fabricación de los moldes de silicona que se emplearon para obtener las muestras cilíndricas fue el siguiente: en primer lugar, mediante un software de diseño asistido por ordenador (NX10; Siemens Inc.) se diseñaron las probetas cilíndricas y los contenedores del molde. A continuación, se utilizó una impresora (3NTR-A2; 3NTR srl) basada en la tecnología FDM para fabricar sendos contenedores utilizando un filamento de ácido poliláctico (PLA/PHA *standard white*; Colorfabb B.V.). Posteriormente, la silicona se vertió dentro del contenedor y sobre un pasador de acero (Figura 3.10). Finalmente, después de 24 horas a temperatura ambiente, el molde se desmoldeó del contenedor y se introdujo en el horno de convección durante el mismo período de tiempo y con la misma rampa de temperatura ascendente y descendente que se aplicó a los compuestos epoxídicos, con posterioridad.



Figura 3.10 Moldes impresos y colada de silicona para la fabricación de probetas de conductividad térmica.

3.2.3 Caracterización mecánica de los compuestos

Previo a la realización de los ensayos mecánicos, las probetas se acondicionaron durante 96 horas en atmósfera estándar 23/50 clase 2 de acuerdo con la norma ISO 291. Para ejecutar los ensayos mecánicos, se utilizó la máquina de ensayos universales (AGS-X 100KN; Shimadzu, Inc) con una célula de carga de 5 kN (Figura 3.11). Se analizaron cinco muestras de cada composición y se calculó el valor promedio y la desviación estándar para los tres tipos de ensayos mecánicos.



Figura 3.11 Máquina de ensayos universales.

3.2.3.1 Ensayo de flexión

Para la medida del desplazamiento de la probeta y posterior cálculo del módulo de flexión (ASTM D 790), se utilizó un video-extensómetro (DVE-201; Sony, Inc.), con una precisión del 1 %. Las probetas se ensayaron con una distancia entre apoyos de 16 veces el espesor de las probetas y se sometieron a una tasa de deformación de 0,01 mm/mm/min según el método A (Figura 3.12).

Las probetas de flexión de dimensiones 127 x 12,7 x 3,5 mm se extrajeron de una muestra de 200 x 100 x 3,5 mm mediante mecanizado con sierra circular (49716 meppen; Metabo, S.A.).

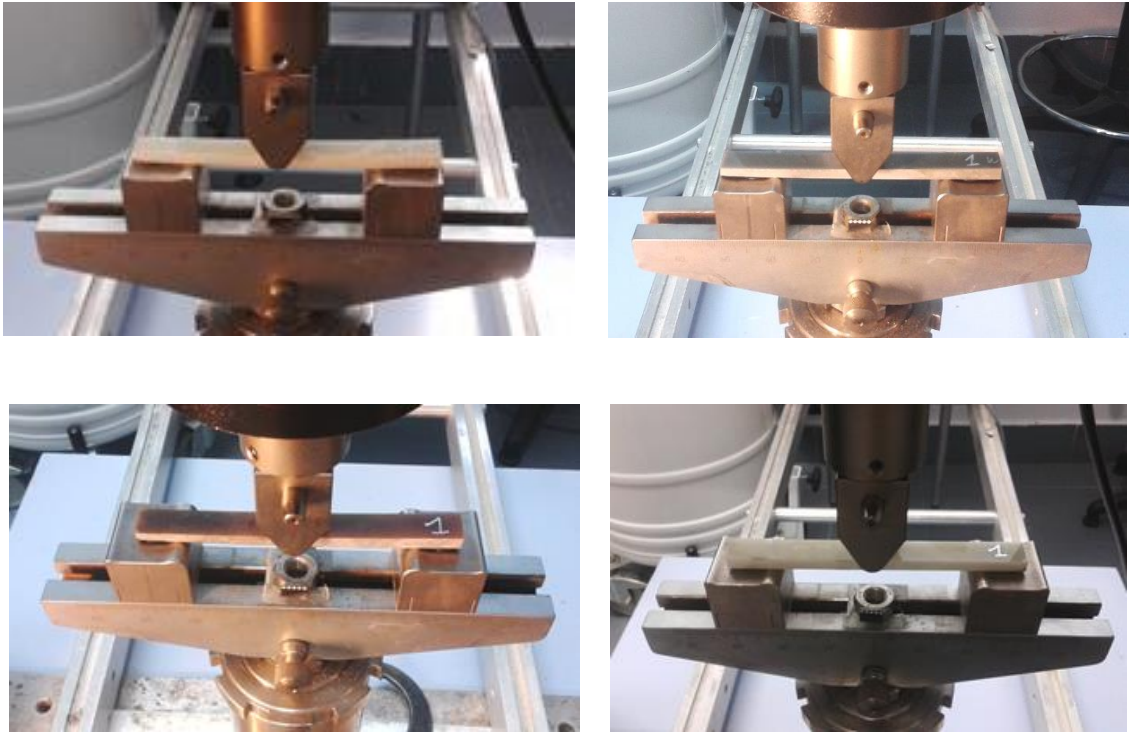


Figura 3.12 Ensayo para la determinación del módulo elástico en flexión de 4 de los 17 compuestos diferentes.

3.2.3.2 Ensayo de tracción

Las probetas del ensayo de tracción (ASTM D 638) se fijaron con mordazas tipo cuña que traccionaron las probetas a una velocidad de 5 mm/min. Para la medida de la deformación de la distancia de referencia de la probeta, se utilizó un extensómetro de contacto (MFA2; Techlab Systems, S.L.) que posee una precisión del 0,2 % (Figura 3.13).

Las probetas de tracción (probeta tipo II según norma ASTM D 638) se extrajeron de una muestra de 200 x 150 x 4 mm mediante fresado CNC (C-3C; Graphimet S.A.).



Figura 3.13 Ensayo para la determinación de la resistencia máxima y módulo elástico en tracción de 4 de los 17 compuestos diferentes.

3.2.3.3 Ensayo de compresión

Para realizar los ensayos de compresión (ASTM D 695) las muestras se colocaron entre dos platos cilíndricos metálicos. A continuación, se comprimieron con una velocidad de cruceta de 1,5 mm/min.

Las probetas de compresión de dimensiones 12,7 x 12,7 x 25,4 mm se extrajeron de una muestra de 200 x 50 x 12,7 mm mediante mecanizado con la sierra circular.

3.2.3.4 Ensayo de dureza barcol

Las probetas para el ensayo de dureza barcol (ASTM D 2583) se acondicionaron durante 48 horas a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y $50 \pm 5 \%$ de humedad relativa antes del ensayo de acuerdo con el método A. A cada compuesto, se le realizaron 29 lecturas (con el durómetro barcol Modelo No. 935), necesarias para materiales no homogéneos y para aquellos con niveles de dureza bajos (Figura 3.14).

Las medidas de dureza se realizaron sobre las muestras de dimensiones 200 x 150 x 4 mm.

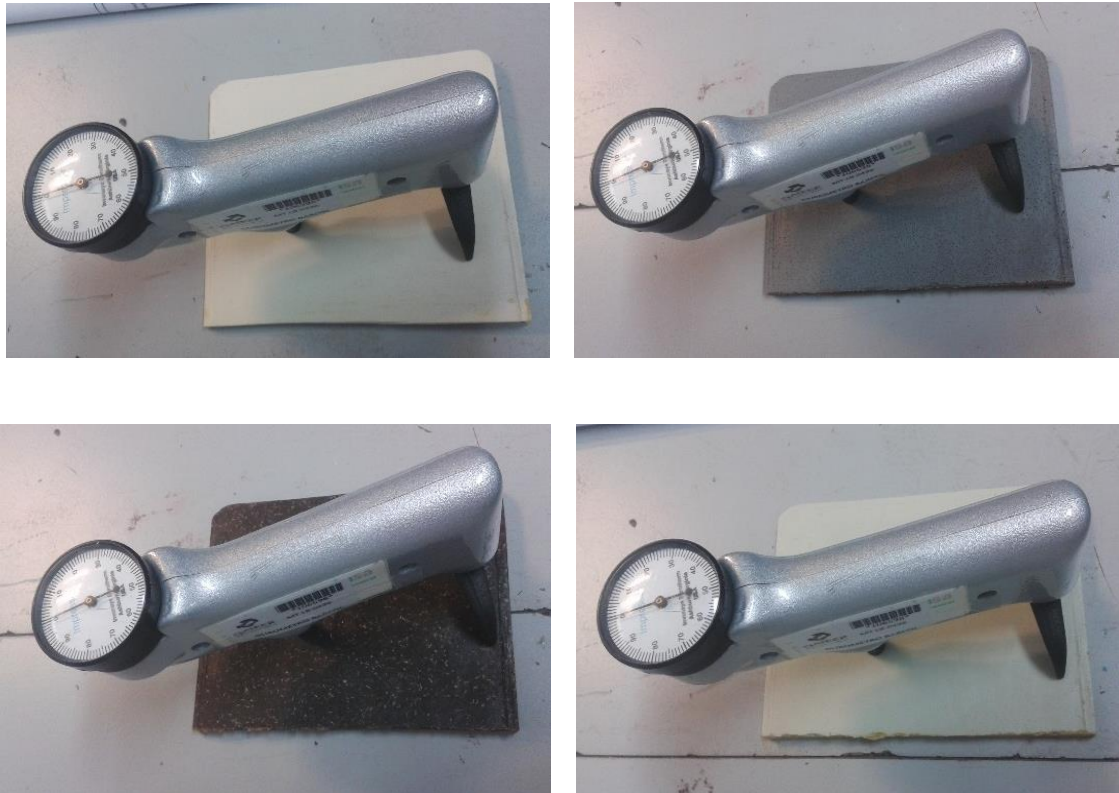


Figura 3.14 Ensayo para la determinación de dureza barcol de 4 de los 17 compuestos diferentes mediante el durómetro barcol.

3.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MOLDES

3.3.1 Diseño y simulación de los moldes de compresión

3.3.1.1 Diseño del molde conceptual

Las características del molde conceptual (Figura 3.15 y Figura 3.16) que pretende analizar la viabilidad de la nueva tecnología, son las siguientes:

- Tamaño (largo por ancho): 140 x 140 mm
- Área de moldeo: cuadrada de 100 x 100 mm, con un agujero cuadrado interior de 40 x 40 mm.
- Ángulos de desmoldeo: 3 °

Para diseñar el 3D del molde, se emplea la herramienta de diseño asistido por ordenador NX10. Tal y como se observa en las Figura 3.15 y Figura 3.16, se diseñan únicamente los moldes, sin considerar las fundas flexibles de silicona.

Las fundas de silicona son dos recubrimientos de espesor alrededor 2 mm, situados entre el material a moldear y cada parte del molde (hembra y macho) de composite. El objetivo de la

funda de silicona es triple, facilitar el desmoldeo de la pieza moldeada y la fabricación del molde, así como, dotar a la pieza moldeada de un acabado superficial liso.

Para la fabricación de las fundas de silicona, se considera una distancia entre los moldes rígidos hembra y macho de seis milímetros, de modo que, al fabricar cada funda con un espesor de dos milímetros, la distancia resultante entre los moldes macho y hembra es de dos milímetros.

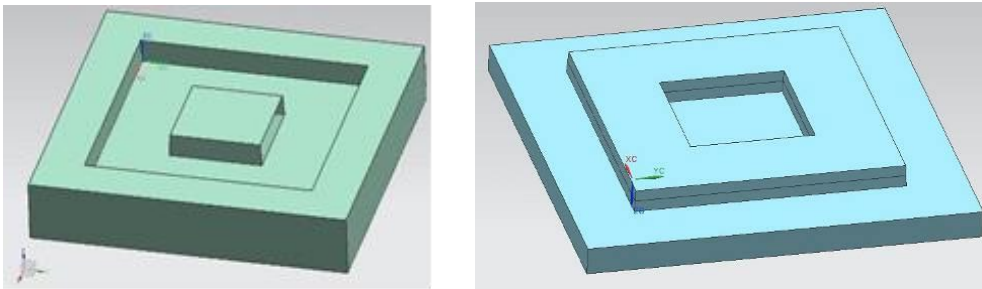


Figura 3.15 Molde hembra (izquierda) y molde macho (derecha).

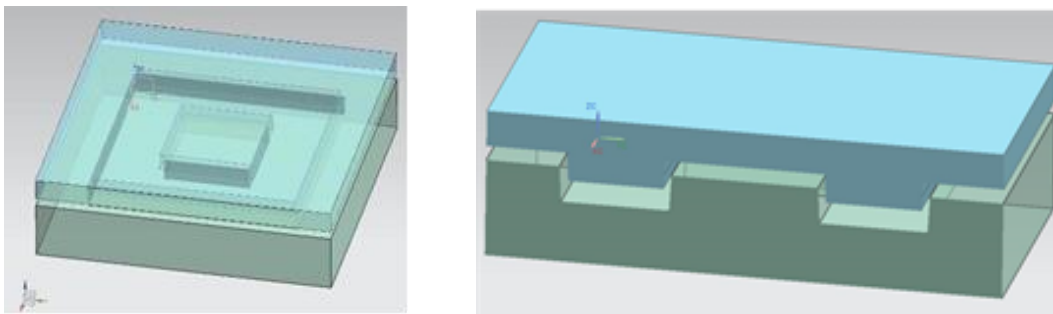


Figura 3.16 Vista isométrica (izquierda) y vista seccional (derecha) del molde conceptual.

3.3.1.2 Diseño del molde con residuos conductores térmicos

Tras las pruebas de moldeo realizadas en el nivel de madurez de la tecnología más bajo, es decir, con el molde conceptual, se realiza un molde demostrador más avanzado y de mayor tamaño, así como, con otras funcionalidades adicionales (como, por ejemplo, un sistema de calefacción incorporado).

Se idearon y diseñaron (mediante el software NX10) dos tipologías de molde de dimensiones 23 x 19 x 13 cm (anchura x altura x profundidad). El primer molde (Figura 3.17) está fabricado únicamente con el compuesto GSS/EP, al que se le añaden dos fundas de silicona, de dos milímetros de espesor) para favorecer el desmoldeo de las piezas. El tipo de cierre que se diseña entre el molde hembra y macho es de tipo vertical (o positivo) con una distancia entre paredes verticales de 1,5 mm.

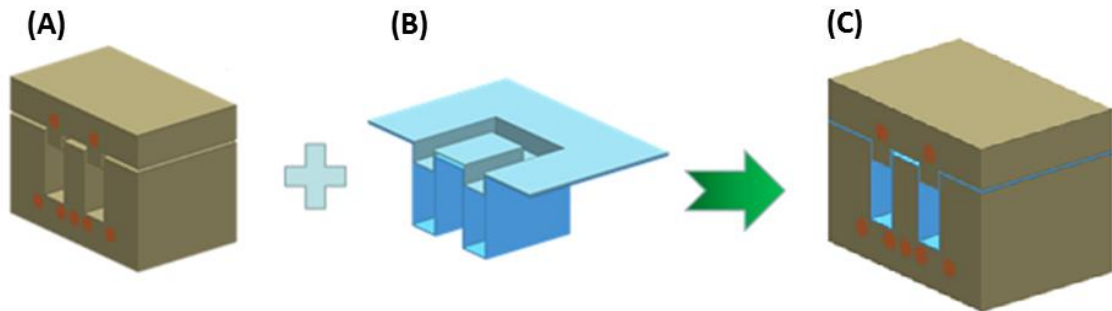


Figura 3.17 Primer molde diseñado. (A) Molde de 40GSS/4GA/EP sin funda de silicona; (B) Funda de silicona; (C) Molde con funda de silicona.

3.3.1.3 Diseño del molde con residuos conductores y no conductores térmicos

El segundo molde (Figura 3.18), se basa en el molde anterior (Figura 3.17), al que se le realiza una división para obtener una zona interior que pretende tener unas características de conductividad térmica y una zona externa con unas propiedades de aislamiento térmico. Para ello, la resina epoxi cargada con residuos conductores térmicos (el compuesto GSS/EP) ocupa la posición interior del molde, mientras que la resina epoxi cargada con residuos no conductores térmicos (el compuesto SMC/EP) ocupa la posición exterior. En este segundo molde, también se diseñaron dos fundas de silicona en las superficies de moldeo (pero en este caso, de cuatro milímetros de espesor).

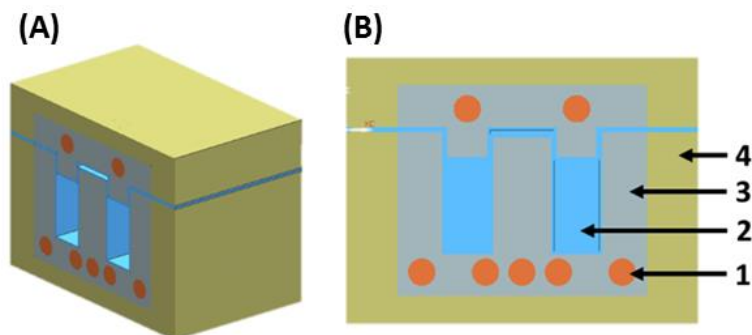


Figura 3.18 Molde diseñado sin barrera térmica. (A) Vista seccional isométrica del molde; (B) Vista seccional frontal del molde, 1: tubería de cobre, 2: Fundas de silicona, 3: compuesto GSS/EP, 4: compuesto SMC/EP.

3.3.1.4 Simulaciones térmicas

El diseño del molde con residuos conductores y no conductores térmicos fue concebido mediante simulaciones térmicas realizadas mediante el software Ansys, Inc. Concretamente, mediante el módulo *Steady-State Thermal*.

Para la realización de dichas simulaciones, primeramente, se diseñó el molde mediante la herramienta de diseño NX. A continuación, a cada componente del molde (Figura 3.18), se le asoció la conductividad térmica que se indica en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Conductividades térmicas de varios materiales.

Material	Conductividad térmica (W/mK)
Cobre	385 [281]
Silicona	0,8 [282]
Fibro cemento	0,022 [283]
40GSS/4GA/EP	0,44
40SMC/4GA/EP	0,18

Las condiciones de contorno aplicadas a la simulación térmica fueron las siguientes (Figura 3.19):

- Temperatura del circuito de calentamiento 130 °C.
- Coeficiente de transferencia de calor (convección natural del aire) aplicado en todas las paredes del molde y en las placas de fibrocemento en contacto con el aire : 5 W/m²K [284].
- Transmisión de calor por conducción entre todos los componentes del sistema (circuito de cobre, zona de molde de 40GSS/4GA/EP y 40SMC/4GA/EP, fundas de silicona y placas de fibrocemento). No se considera que hay transmisión de calor en las caras de las placas de fibrocemento en contacto con los platos de compresión de la máquina de ensayos.

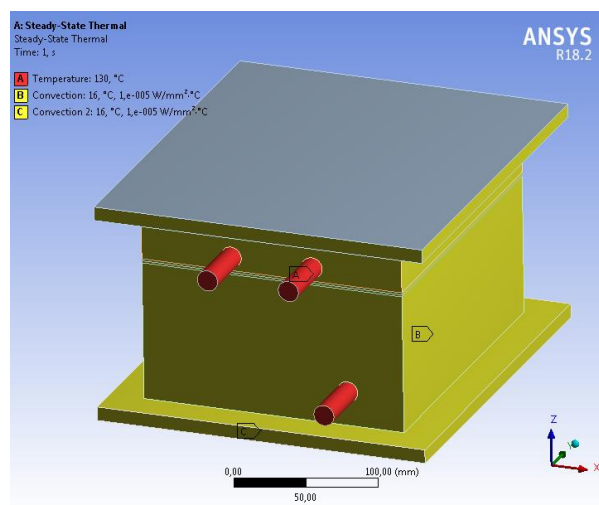


Figura 3.19 Condiciones de contorno aplicadas a los modelos.

3.3.2 Fabricación de los moldes de compresión

3.3.2.1 Fabricación del molde conceptual

En la construcción de ambas partes del molde, se emplearon dos estrategias diferentes. La primera estrategia, se basa en colar un compuesto epoxídico sobre un modelo de PLA/PHA *standard white* fabricado mediante la impresora 3D, previamente impregnado en cera. Este modelo se cierra con un marco de madera o de PLA/PHA, a modo de cartolas (Figura 3.20 y Figura 3.21).

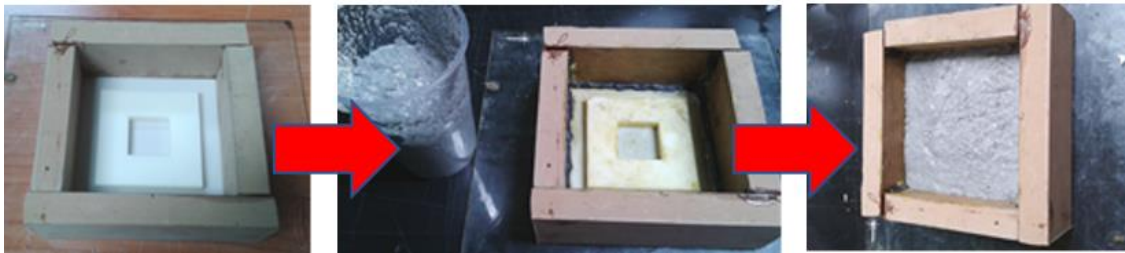


Figura 3.20 Fabricación del molde-demostrador hembra.

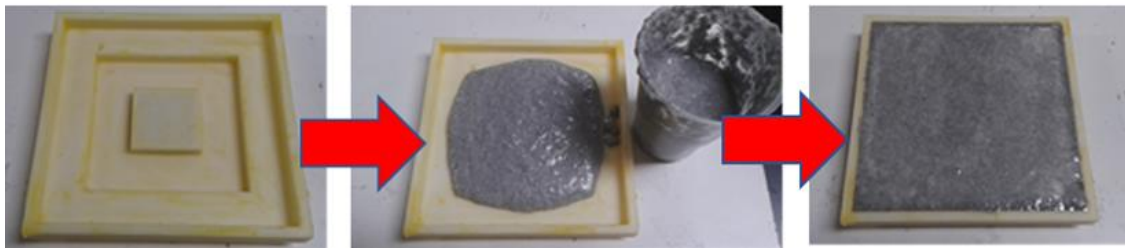


Figura 3.21 Fabricación del molde-demostrador macho.

La segunda estrategia (Figura 3.22), se basa en colar silicona sobre el modelo de PLA/PHA y tras el curado de la silicona, verter el compuesto epoxídico.

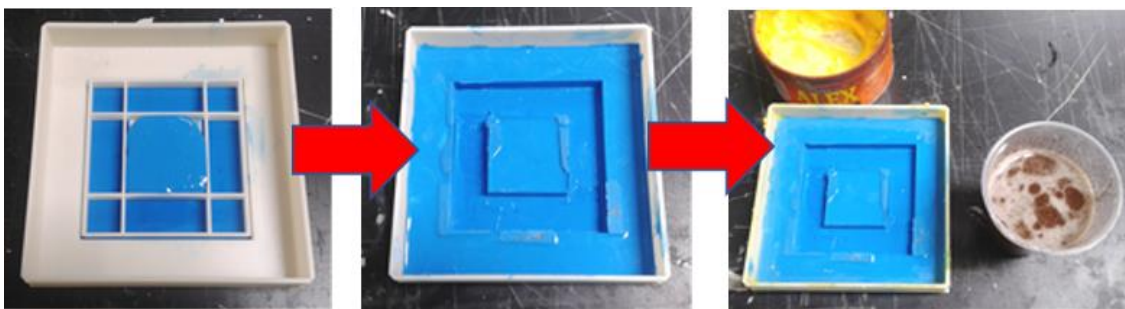


Figura 3.22 Fabricación del molde-demostrador hembra.

3.3.2.2 Fabricación del molde con residuos conductores térmicos

Se extrajeron las superficies exteriores del molde diseñado y se modificaron para darles un grosor de aproximadamente dos milímetros, con objeto de diseñar sendos recipientes donde colar primeramente la silicona y posteriormente el compuesto resina epoxi con carga seleccionado (40GSS/4GA/EP). Asimismo, se diseñaron unas cartolas auxiliares para colar en ellas la silicona y obtener las paredes verticales de las fundas. Tanto los recipientes como los marcos auxiliares se fabricaron mediante la impresora 3D (3NTR-A2; 3NTR srl) basada en la tecnología FDM, utilizando dos tipos de filamentos de (PLA/PHA *leaf/green* y PLA/PHA *standard white*). La sistemática de fabricación del compuesto 40GSS/4GA/EP fue la misma que la realizada para la fabricación de las probetas de este mismo material.

La metodología de fabricación tanto del molde macho como del molde hembra se describe a continuación y se muestra en las Figura 3.23 y Figura 3.24:

- (A) Se mezcla manualmente con un agitador la silicona base y el endurecedor y se vierte la silicona en dos etapas (con un curado durante 2 h a 45 °C en un horno de convección después de cada paso). En la primera etapa se fabrica la base plana inferior vertiendo la silicona sobre el recipiente. En la segunda etapa se fabrican las paredes verticales y las superficies planas superiores, vertiendo la silicona en el recipiente y entre los marcos auxiliares de impresión 3D.
- (B) El circuito fabricado mediante tubería de cobre soldada se coloca en el recipiente de impresión 3D.
- (C) Se vierte el compuesto epoxídico cargado con GSS (en dos etapas en el caso del molde hembra para evitar que una exotermia excesiva haga reblandecer el recipiente). Para obtener una superficie lisa, la última colada (de entre uno y dos milímetros de espesor) se realiza con resina epoxi sin carga. Finalmente, tras 6 horas de curado a temperatura ambiente, el molde se desmoldea del recipiente y se postura en el horno de convección durante 13 horas (6 horas de calentamiento de 40 °C a 160 °C con una rampa de temperatura de 20 °C/h y 7 h de enfriamiento con una rampa descendente de temperatura de 20 °C/h).

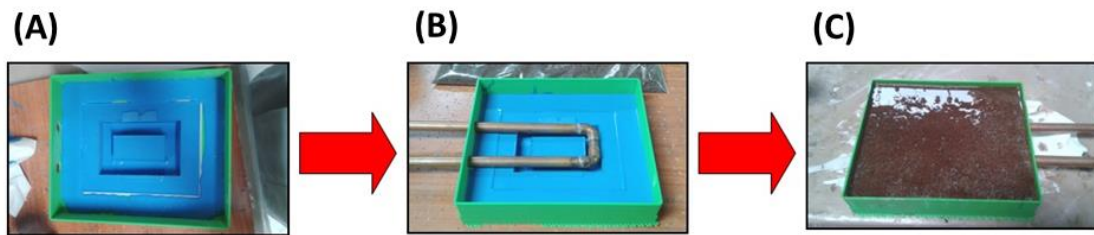


Figura 3.23 Secuencia de fabricación del molde macho.

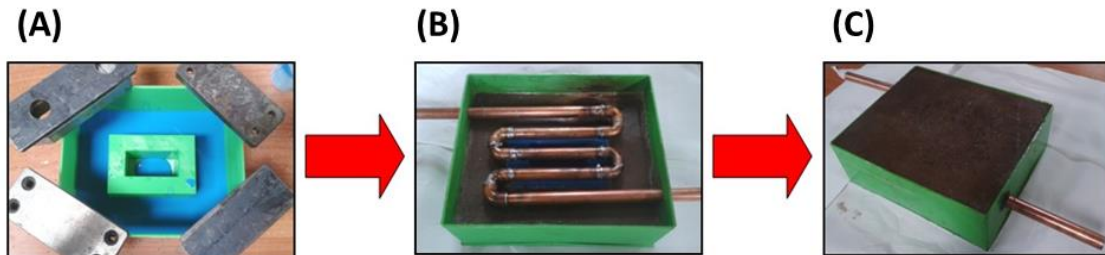


Figura 3.24 Secuencia de fabricación del molde hembra.

3.3.2.3 Fabricación del molde con residuos conductores y no conductores térmicos

En este caso también se extraen las superficies exteriores, pero del diseño del molde con barrera térmica, y se les dota de un grosor de cuatro milímetros, para obtener dos recipientes donde colar primeramente la silicona, a continuación, el compuesto de resina epoxi con carga conductora térmica (40GSS/4GA/EP) y finalmente el compuesto de resina epoxi con carga no conductora térmica (40SMC/4GA/EP). Se utilizó la impresora 3NTR-A2 y el filamento PLA/PHA *standard white* para fabricar tanto los recipientes como los marcos auxiliares. La metodología empleada para la fabricación del compuesto 40SMC/4GA/EP fue la misma que la realizada para la fabricación de las probetas de este mismo material.

La secuencia de construcción del molde macho y hembra se describe a continuación, y se muestra en las Figura 3.25 y Figura 3.26:

- (A) Se mezcla manualmente con un agitador la silicona base y el endurecedor y se vierte la silicona en dos etapas (con un curado durante 2h a 45 °C en el horno de convección después de cada paso). En la primera etapa se fabrica la base plana inferior vertiendo la silicona sobre el recipiente. En la segunda etapa se fabrican las paredes verticales y las superficies planas superiores, vertiendo la silicona en el recipiente y entre los marcos auxiliares de impresión 3D.
- (B) El circuito fabricado mediante tubería de cobre soldada se coloca en el recipiente de impresión 3D.

- (C) Se vierte el compuesto epoxídico cargado con GSS (en dos etapas en el caso del molde hembra para evitar que una exotermia excesiva haga reblandecer el recipiente). Posteriormente, tras 6 horas de curado a temperatura ambiente, se eliminan las cartolas interiores del recipiente.
- (D) Se cataliza la silicona y se vierte en la base del recipiente (se cura durante 2h a 45 °C en el horno de convección).
- (E) Se vierte el compuesto epoxídico cargado con partículas de SMC. Para obtener una superficie plana, la última colada (de entre uno y dos milímetros de espesor) se realiza con resina epoxi sin carga. Finalmente, el molde se desmoldea del recipiente y se postura en el horno de convección durante 13 horas (6 horas de calentamiento de 40 °C a 160 °C con una rampa de temperatura de 20 °C/h y 7 h de enfriamiento con una rampa descendente de temperatura de 20 °C/h).

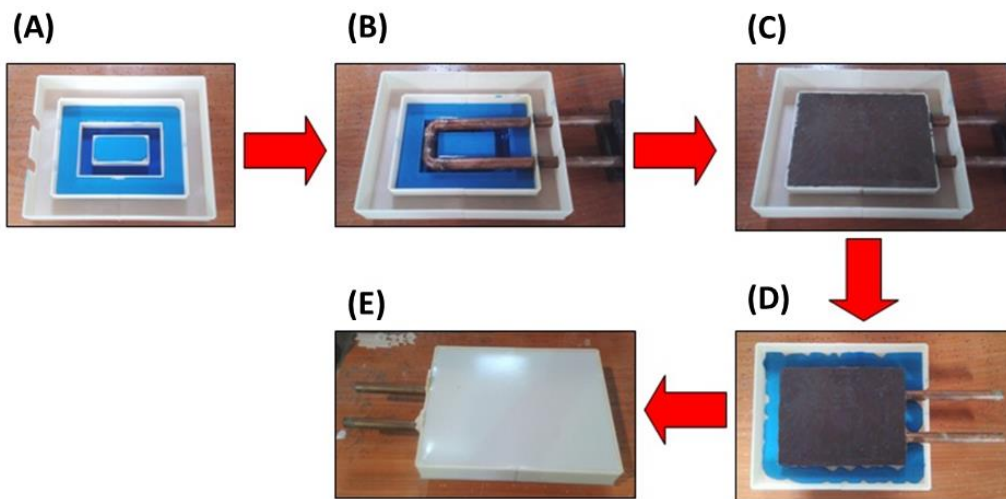


Figura 3.25 Secuencia de fabricación del molde macho (con barrera térmica).

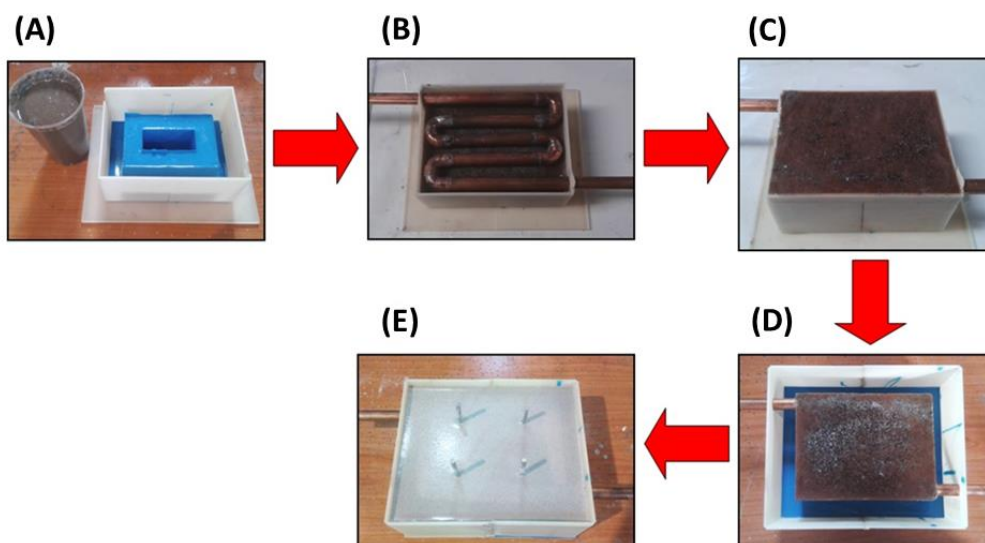


Figura 3.26 Secuencia de fabricación del molde hembra (con barrera térmica).

3.3.3 Pruebas de moldeo

3.3.3.1 Moldeo con el molde conceptual

Con el molde conceptual fabricado mediante la estrategia segunda, se realizan unas pruebas de moldeo con preimpregnados. Se usa un preimpregnado vinilester-epoxi con tejido de fibra de vidrio y preimpregnado poliéster (denominado Verkid PG18-G250 1015) compuesto por resina poliéster isoftálica y *mat* de fibra (Figura 3.27).



Figura 3.27 Preimpregnado vinilester-epoxi con tejido de fibra de vidrio (izquierda) y preimpregnado poliéster con *mat* de fibra de vidrio (derecha).

Se cortan manualmente los preimpregnados mediante un patrón y se plantean tres tipos de laminados o apilamientos:

- Laminado 1: Preimpregnado vinilester-epoxi con tejido de fibra de vidrio (Figura 3.28)
- Laminado 2: Preimpregnado poliéster con *mat* de fibra de vidrio (Figura 3.28)
- Laminado Mixto: Mitad preimpregnado vinilester-epoxi y mitad preimpregnado poliéster (Figura 3.29)



Figura 3.28 Patrones de preimpregnado vinilester-epoxi (izquierda) y poliéster (derecha).

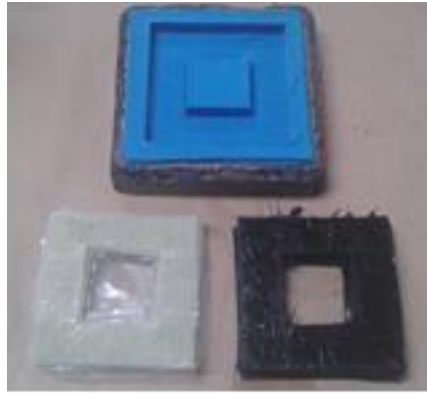


Figura 3.29 Laminado mixto.

Al moldear estos tres laminados se evalúa si los parámetros de moldeo son los mismos, (independientemente del formato de fibra), así como, otras características, de forma general, como el aspecto visual del moldeado, posibles rebabas, la compactación entre las láminas y otros posibles defectos.

Empleando la máquina universal de ensayos mecánicos Shimadzu AGS-X 100KN y con los platos de compresión de acero (Figura 3.30), se presan (con una temperatura de molde entre 100-110 °C y una presión de 2,5 kg/cm²) cada uno de los laminados propuestos en el molde (que previamente ha sido introducido en la estufa a 120 °C).

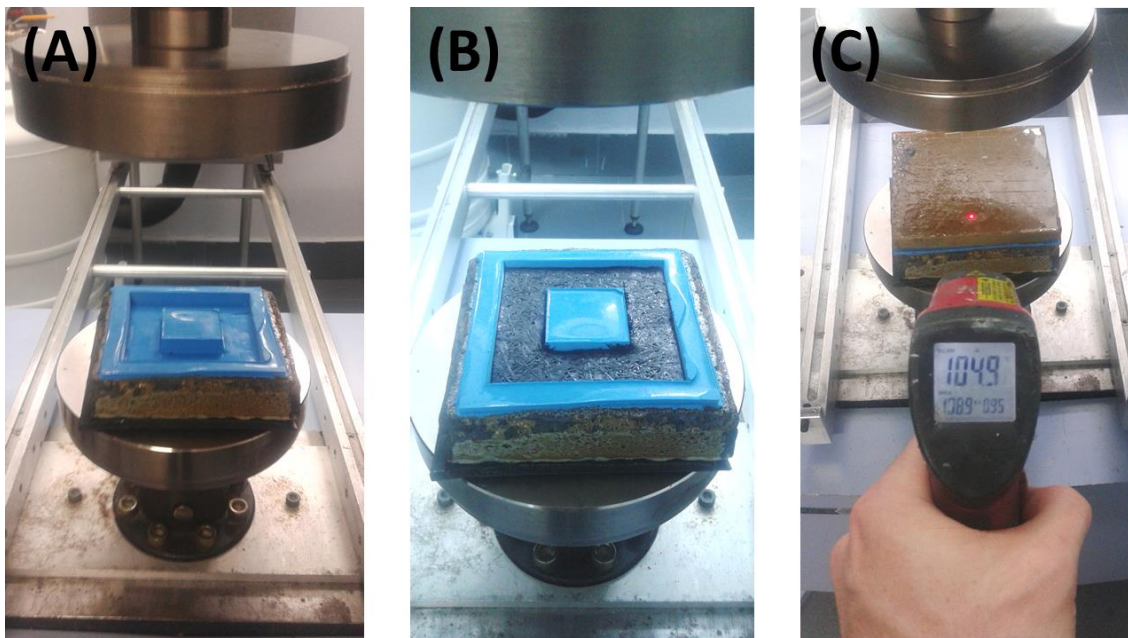


Figura 3.30 (A) Colocación del molde en la máquina de ensayos universales; (B) Introducción del preimpregnado; (C) Medición de la temperatura del molde previo al inicio de la compresión.

3.3.3.2 Moldeo con el molde de residuos conductores térmicos

Las pruebas de moldeo mediante compresión en caliente se realizaron en la máquina de ensayos universales y para calentar el molde se utilizó un calentador de aceite (STO 109; Diapam S.A.), tal y como se muestra en la Figura 3.31. A continuación, el molde se colocó entre las dos placas metálicas de compresión, y entre el molde y las placas de acero se colocaron sendas placas de fibrocemento para crear una barrera térmica y minimizar la pérdida de calor a través de las placas de acero (Figura 3.32).



Figura 3.31 Montaje del molde en la máquina de ensayos universales acoplado al calentador de aceite.

La temperatura del aceite de la máquina de calentamiento se fijó en 120 °C y las pruebas de moldeo comenzaron 2,5 horas más tarde cuando se alcanzó una situación o régimen estable en el tiempo. Cada apilado del preimpregnado (Verkid PG18-G250 1015; Astar S.A.) se pesó y se colocó en diferentes porcentajes de ocupación de la superficie de moldeo. Las pruebas de moldeo se realizaron a una velocidad de compresión dada hasta alcanzar la posición que coincidía con el espesor de la pieza a moldear, obteniendo una presión máxima diferente para cada velocidad de prueba.

Aunque la ficha técnica del Verkid PG18-G250 1015 recomienda un tiempo de curado de 27 ± 5 s/mm de espesor a 140 °C, se ha aumentado el tiempo de moldeo a 90 s/mm, para contrarrestar la menor temperatura de moldeo y asegurar el curado completo de la pieza.

Este incremento de tiempo está relacionado con la dependencia de la reacción de polimerización con la temperatura, que respeta, por lo general, la regla de que para cada 10 °C de disminución de la temperatura se requiere aumentar el tiempo de curado en aproximadamente un 50 % [285].

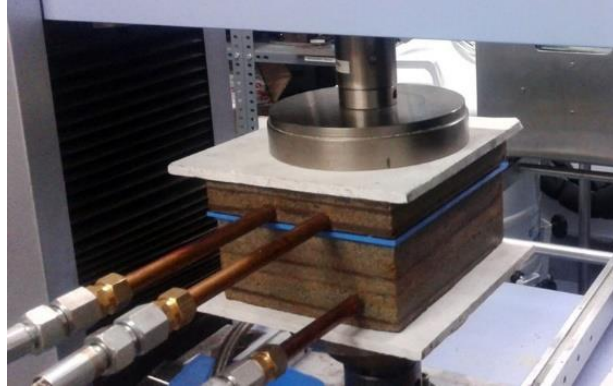


Figura 3.32 Método de compresión del molde mediante platos de acero.

3.3.3.3 Pruebas de moldeo y monitorización de los moldes

En esta segunda etapa de moldeo, al igual que en la etapa previa, se moldearon piezas de SMC, con la diferencia de que en esta ocasión se colocaron sensores de temperatura en ambos moldes fabricados.

Las pruebas de moldeo se realizaron igualmente en la máquina de ensayos universales, se acoplaron las tuberías del calentador de aceite y se colocaron tanto encima como debajo de los moldes dos placas de fibrocemento, para evitar pérdidas de energía térmica por los platos metálicos de la máquina de ensayos. La rampa de calentamiento que se consignó al calentador de aceite fue ligeramente diferente respecto de las pruebas anteriores ejecutadas sin los termopares acoplados a los moldes, y se indica a continuación.

Se indicó al calentador de aceite una temperatura consigna de 90 °C y cuando el aceite alcanzó los 90 °C de temperatura, éste se apagó durante 15-20 minutos. A continuación, se indicó una temperatura consigna de 120 °C. Aproximadamente media hora después, ambos moldes alcanzaron un estado estable en el tiempo.

A continuación, se comenzó a introducir cada apilamiento de capas de SMC (Verkid PG18-G250 1015; Astar S.A.) en el molde hembra durante un periodo de tiempo de quince minutos en todos aquellos intervalos de tiempo posteriores en los que la resistencia de calentamiento de aceite se apagó durante las siguientes siete horas. Cada apilamiento de capas se pesó, se introdujo en el molde hembra ocupando aproximadamente el 80% de la superficie de moldeo y se comprimió mediante el molde macho hasta que alcanzó la posición que coincidía con el grosor de la pieza moldeada.

Para medir la temperatura en diferentes ubicaciones de ambos moldes, se colocaron termopares en dos localizaciones (Figura 3.33), así como una tercera para medir la temperatura del ambiente. Estos sensores térmicos se conectaron a un software de registro de datos (PicoLog 6; Pico Technology, Ltd) para monitorizar la temperatura en tiempo real.

Para calcular el consumo de energía de los moldes durante el período de l ensayo, se utilizaron los datos de potencia del equipo de calentamiento de aceite (7,5 KW). Su resistencia de calentamiento solo tiene dos tipos de regímenes de potencia (encendido o apagado). Los termopares ubicados en la entrada de aceite indican los momentos en que la resistencia de aceite se enciende y apaga, debido a un aumento brusco de la temperatura del aceite . Así pues, conocido el periodo de funcionamiento de la resistencia y su potencia, se calcula el consumo de energía durante el período del ensayo (tras alcanzar el régimen estable).

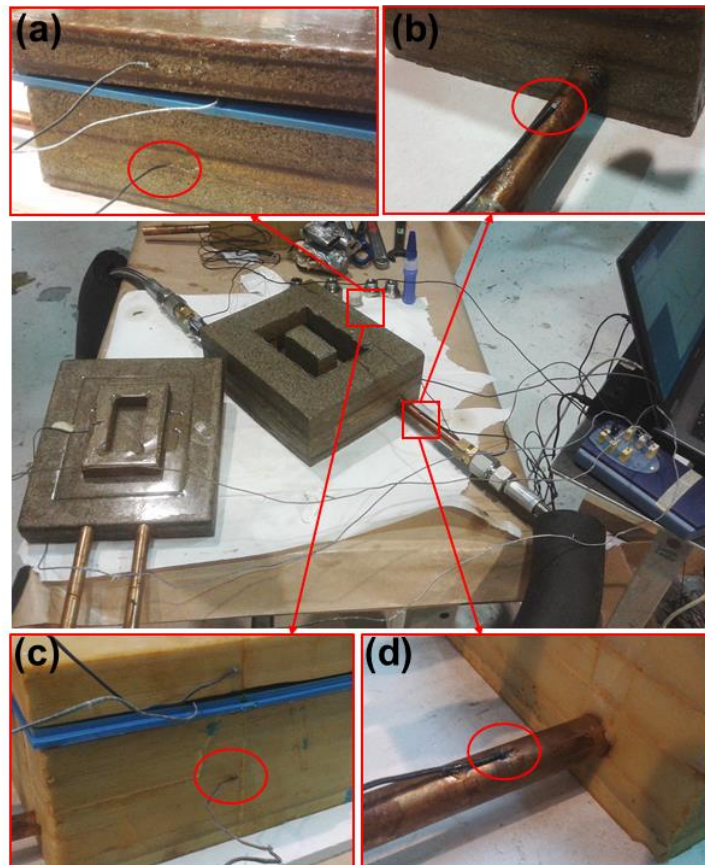


Figura 3.33 Ubicación de los termopares en el molde sin barrera térmica: (a) zona exterior del molde inferior, (b) Entrada de aceite. Ubicación de los termopares en el molde con barrera térmica: (c) zona exterior del molde inferior, (d) Entrada de aceite.

3.3.4 Ejemplo de aplicación: dispositivo de cubrimiento

Existen multitud de clases, tamaños y diseños de dispositivos de cubrimiento. Sin embargo, con el objetivo de explorar la idea del presente trabajo, se seleccionan dos dispositivos. Cada uno de ellos, pertenece a una clase, un tamaño y un diseño.

El primer tipo de dispositivo de cubrimiento seleccionado es de la clase C250 y se puede encontrar en numerosas zonas de la ciudad de Bilbao (Figura 3.34). Ésta, tiene un tamaño de 60 x 30 cm (ancho x largo) y se coloca simplemente apoyada en un marco que tiene un asiento de altura 3 cm. En general, va instalada en bordes de calzada de zonas poco transitadas.

El segundo tipo de dispositivo de cubrimiento seleccionado es de la clase D400, siendo ésta una de las rejillas que mayor presencia tiene en Bilbao (Figura 3.34). Tiene un tamaño de 60 x 60 cm (ancho x largo) y se coloca simplemente apoyada en un marco que tiene un asiento de altura 6 cm. En general, va instalada en bordes de calzada, aunque también se instalan en aceras transitables por vehículos.

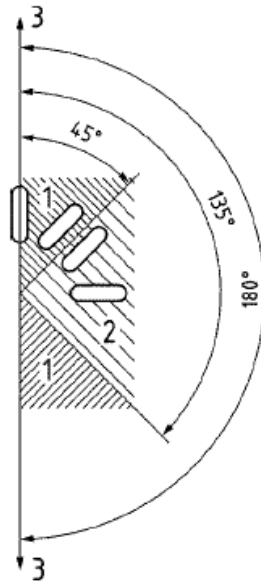


Figura 3.34 Dispositivo de cubrimiento clase C250 (izquierda) y de clase D400 (derecha).

El primer paso para diseñar un nuevo dispositivo de cubrimiento requiere atender las consideraciones que se describen en el apartado 6 de la norma UNE-EN 124:2015. En él, se indican los requerimientos de dimensiones de las ranuras, el área mínima de desagüe, la holgura entre el marco y rejilla, profundidad y área del marco, aseguramiento de la rejilla en el marco, etc.

Algunas de las consideraciones más importantes a tener en cuenta en el diseño, porque afectan a la resistencia mecánica del elemento, son el área de desagüe y la forma, número y localización de las ranuras. De hecho, este binomio es la base sobre la cual se sustentan todos los diseños realizados.

Tal y como se describe en el apartado 6.8.1 de la norma UNE-EN 124:2015, el área de desgaste no puede ser inferior que el 30 % de la cota de paso. En el siguiente apartado 6.8.2 se indica que las ranuras deben tener las dimensiones mostradas en la tabla 3 de dicha norma. Además, las dimensiones de las ranuras de los dispositivos de cubrimiento para las clases C250 (este caso en concreto) hasta F900 dependen de la orientación relativa de ésta y el tráfico, de acuerdo con la tabla 3 y la figura 8 de la norma UNE-EN 124:2015 (Figura 3.35) y Tabla 3.4, respectivamente.



Leyenda

- 1 Orientación posición 1
- 2 Orientación posición 2
- 3 Dirección del tráfico

Figura 3.35 Orientación de las ranuras [286].

Tabla 3.4 Orientación y dimensiones de las ranuras [286].

Aberturas			Clase	Anchura (mm)	Longitud (mm)
Ranuras rectas	Orientación de acuerdo con la figura 8	Posición 1 y 2	A15 y B125	8 a 18	Sin limitación
				>18 a 25	<170
		Posición 1	C250 y F900	16 a 32	<170
		Posición 2	C250	16 a 42	Sin limitación
			D400 y F900	18 a 42	Sin limitación
Ranuras en otras formas	Las ranuras en otras formas no pueden exceder una anchura de 25 mm para las clases A15 y B125 y una anchura de 42 mm para las clases C250 a F900. Deben ser inferiores a 170 mm de longitud.				

En este caso en concreto, se toma el valor mínimo de área de desagüe, de esta manera se considera que existen más posibilidades de lograr el objetivo. Para ello, a continuación, se han de atender los requerimientos de superación carga y el modo de aplicación de la misma.

Todo dispositivo debe superar una carga determinada descrita en la tabla 4 de la norma UNE-EN 124:2015 (Tabla 3.5). Si la cota de paso del dispositivo es inferior a 250 mm, la carga a aplicar será igual a la Cota de paso dividido por 250 mm y multiplicado por el valor correspondiente de la mencionada tabla.

Tabla 3.5 Carga correspondiente a cada clase de dispositivo de cubrimiento [286].

Clase	A 15	B 125	C 250	D 400	E 600	F 900
F_T en kN	15	125	250	400	600	900

Dicha carga, debe ser aplicada mediante el tipo de indentador que corresponda según el anexo A.3.1 y tabla A.1 de la norma UNE-EN 124:2015 (Figura 3.36).

Medidas en milímetros

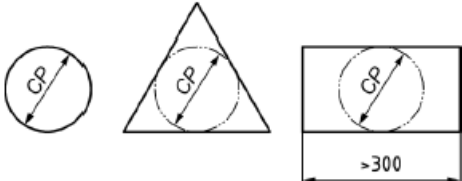
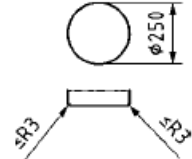
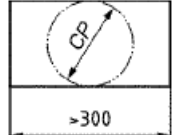
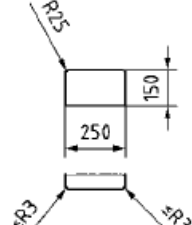
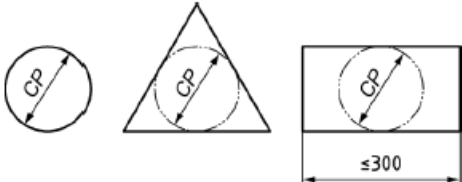
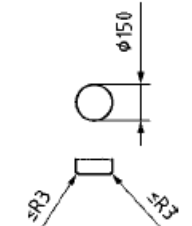
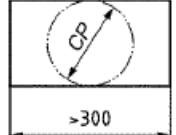
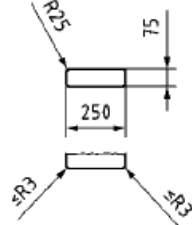
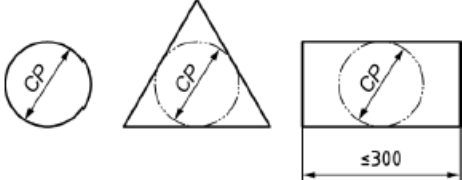
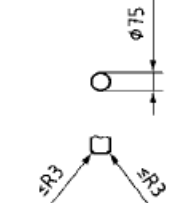
Cota de paso	Forma del dispositivo de cubrimiento o de cierre	Medidas de los bloques de ensayo
$300 < CP \leq 1\ 000$		
$200 \leq CP \leq 300$		
$200 \leq CP \leq 300$		
$CP < 200$		
$CP < 200$		

Figura 3.36 Formas y dimensiones de indentadores en función de la clase del dispositivo [286].

Para evaluar si el dispositivo de cubrimiento diseñado supera la carga que establece la norma, se emplea la herramienta de elementos finitos AnsysV19. Mediante esta aplicación informática, se realiza una simulación estructural para obtener las tensiones que está sufriendo la pieza.

Los modelos de elementos finitos de dichos análisis están compuestos por un conjunto de cuatro piezas: el propio dispositivo o rejilla, un modelo simplificado de marco, un indentador y un componente elástico (semejante en cuanto a elasticidad a un trozo de neumático), que se introduce para evitar tensiones locales elevadas.

Los materiales que acompañan a cada pieza son los siguientes (Tabla 3.6):

Tabla 3.6 Materiales de los componentes que conforman el modelo de elementos finitos.

Componente	Material
Dispositivo de cubrimiento	Preimpregnado viniléster-epoxi con fibra biaxial de vidrio y Preimpregnado poliéster con mat de fibra de vidrio
Marco de apoyo	Acero
Indentador	Acero
Componente flexible	Caucho

Se requieren nueve constantes elásticas y cinco de resistencia para definir un material ortótropo y dos constantes elásticas y una de resistencia para definir un material isótropo [287]. Las características mecánicas introducidas en los modelos de elementos finitos han sido las siguientes (Tabla 3.7).

Tabla 3.7 Constantes elásticas y de resistencia de los materiales empleados.

Material	Constantes elásticas	Constantes de resistencia
Preimpregnado viniléster-epoxi con fibra biaxial de vidrio (66% de contenido en vidrio según ISO 1172)	$E_x = E_y : 22.233 \text{ MPa (ISO 527-4)}$ $E_z : 8.672 \text{ MPa (ASMERTP1-M3)}$ $\nu_{xy} : 0,12 \text{ (ISO 527-4)}$ $\nu_{xz} = \nu_{yz} : 0,26 \text{ (ISO 527-4)}$ $G_{xy} : 3.130 \text{ MPa (ISO 14129)}$ $G_{xz} = G_{yz} : 2.840 \text{ MPa (ISO 14130)}$	$X_t = Y_t = X_c = Y_c : 336 \text{ MPa (ISO 527-4)}$ $S : 37 \text{ MPa (EN 13121-3 anexo D7)}$
Preimpregnado poliéster con mat de fibra de vidrio (46 % de contenido en vidrio según ISO 1172)	$E : 11.386 \text{ MPa}; 0,33 \text{ (ISO 527-4)}$	$R_T : 152 \text{ MPa (ISO 527-4)}$
Indentador	$E : 210.000 \text{ MPa}; \nu : 0,3$	-
Componente flexible	$E : 50 \text{ MPa}; \nu : 0,4 \text{ [288]}$	-

Las condiciones de contorno que se aplican a los modelos de elementos finitos en dichos cálculos estructurales son semejantes para los dos tipos de dispositivos seleccionados. Se muestran a continuación:

- Magnitud de carga y dimensiones del indentador para cada tipo de dispositivo (Tabla 3.8: tabla A.1 de la norma UNE-EN 124:2015). Figura 3.37.
- Restricción de los tres grados de libertad en la base (o superficie inferior) del marco (diseñado en 3D de forma simplificada).

- Condición de simetría (se representa únicamente un cuarto del modelo de elementos finitos). Figura 3.37.

Tabla 3.8 Magnitud de carga y dimensiones del indentador para cada tipo de dispositivo.

Tipo dispositivo	Indentador	Carga
Clase C250 60x30	250x150mm (Rectangular)	250 KN
Clase D400 60x60	Diámetro 250mm (Circular)	400 KN

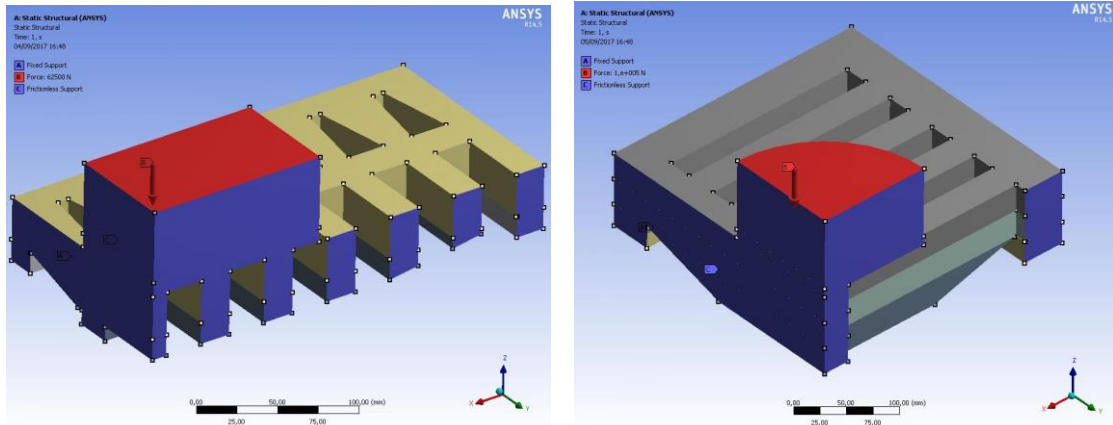


Figura 3.37 Localización (en azul) de la condición de simetría y (en rojo) fuerza sobre el modelo C250 (izquierda) y sobre el modelo D400 (derecha).

Las condiciones de contacto entre piezas son las siguientes:

- Contacto sin rozamiento entre las superficies del marco de la rejilla con la rejilla. Contacto sin rozamiento entre las superficies de la rejilla y el elemento flexible. Figura 3.38.
- Unión solidaria entre las superficies comunes del elemento flexible y el indentador. Figura 3.38.

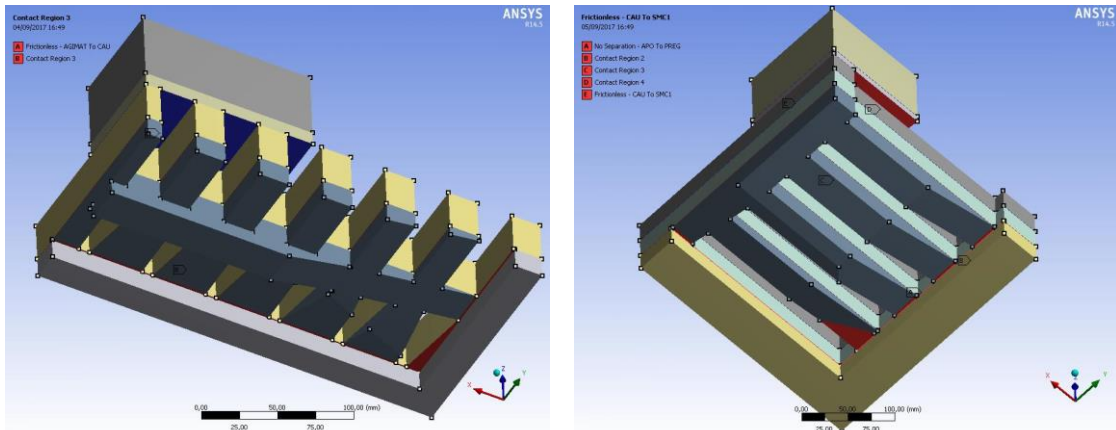


Figura 3.38 Contactos entre los componentes del molde C250 (izquierda) y del modelo D400 (derecha).

Ambos modelos se malla empleando elementos hexaédricos y tetraédricos (Figura 3.39 y Figura 3.40):

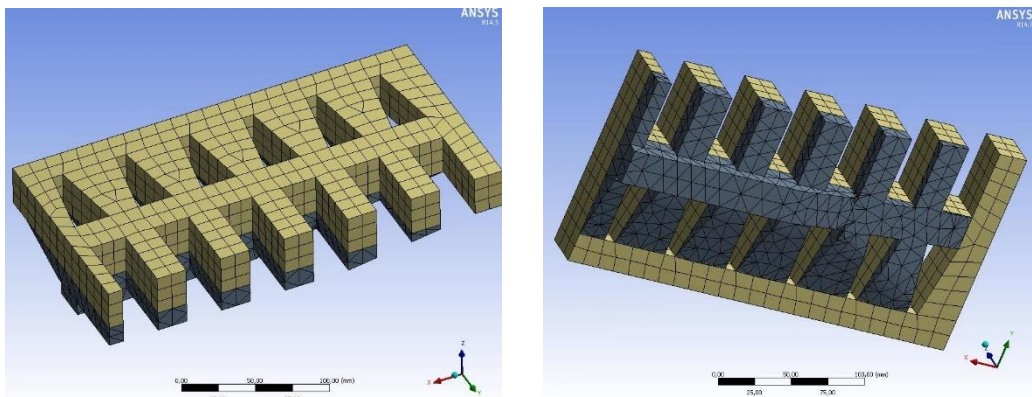


Figura 3.39 Mallado del modelo C250.

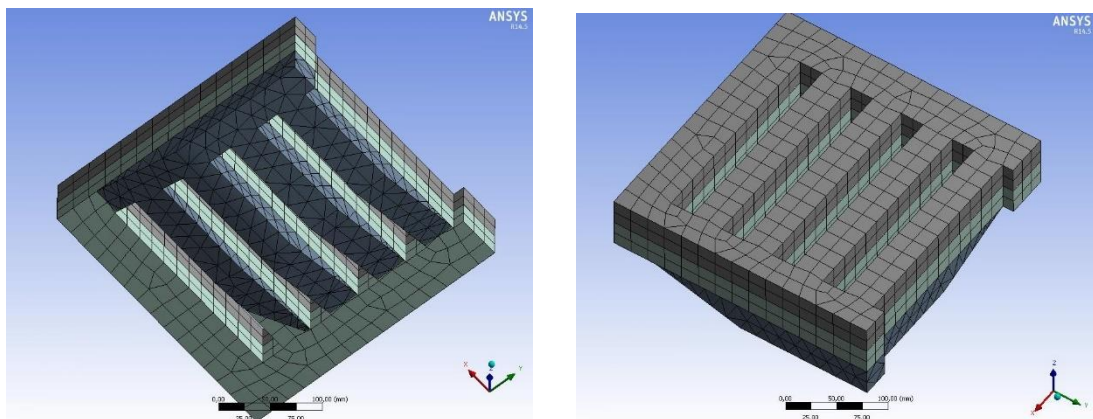


Figura 3.40 Mallado del modelo D400.

Para evaluar si los diseños son capaces de superar la carga establecida, se analizan las tensiones en el laminado ortótropo (preimpregnado reforzado con tejido biaxial de vidrio) aplicando el

criterio de máxima tensión de los cinco modos de rotura principales (tomando como simplificación que la tensión de rotura a tracción es la misma que la tensión de rotura por compresión). Para ello, se analizan cuatro representaciones tensionales del modelo de elementos finitos (Figura 3.41):

- S_1 : Tensión normal en la dirección 1 (paralelo a la fibra).
- S_2 : Tensión normal en la dirección 2 (paralelo a la fibra y ortogonal a la dirección 1).
- S_{13} : Tensión de cortadura interlaminar (en un plano normal a la dirección 3; y en la dirección 1).
- S_{23} : Tensión de cortadura interlaminar (en un plano normal a la dirección 3; y en la dirección 2).

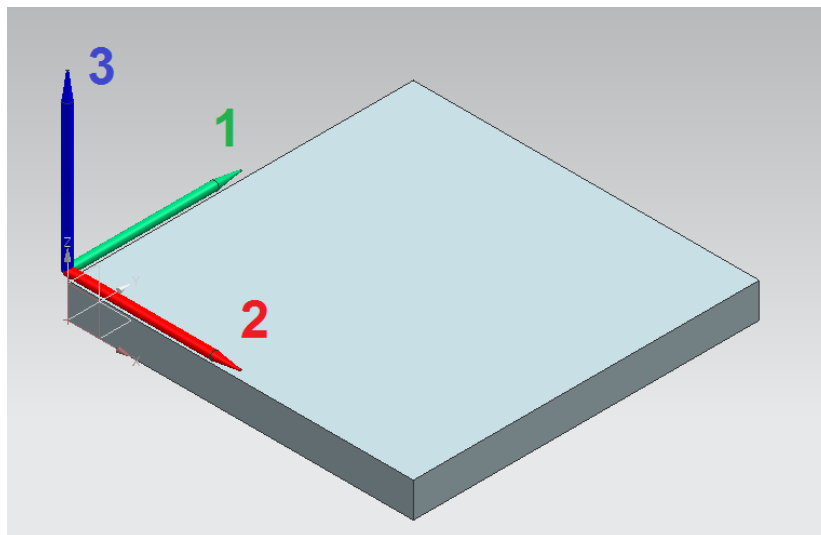


Figura 3.41 Representación gráfica de las direcciones tensionales.

Asimismo, es necesario analizar las tensiones Von Mises (σ_{VM}) en el preimpregnado reforzado con *mat* de fibra de vidrio considerado cuasi-isótropo [289] aplicando dicho criterio de Von Mises.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen y discuten los resultados logrados en este estudio. Tal y como se ha mostrado en el capítulo tercero, se han desarrollado y caracterizado numerosos compuestos basados en resina epoxi con carga tanto residual como comercial de diversa naturaleza.

Asimismo, se ha diseñado y desarrollado una metodología de fabricación de moldes económicos y sostenibles (utilizando los compuestos desarrollados y con el apoyo de las simulaciones térmicas) dirigida a la producción de prototipos o series cortas de fabricación. Finalmente, se han dimensionado estructuralmente sendos dispositivos de cubrimiento (una posible aplicación).

De modo que, en primer lugar, se muestra y analiza la naturaleza y las características morfológicas de las cargas empleadas en esta investigación. En segundo lugar, se presentan y se discuten los resultados de la caracterización mecánica y térmica de todos los compuestos desarrollados.

A continuación, se exhiben y analizan las consecuencias de las pruebas de moldeo realizadas, no solamente en torno a la factibilidad de la utilización de los moldes para moldear series cortas de piezas, sino también sobre su consumo energético durante el proceso de moldeo. Finalmente, se exponen y se discuten los resultados del dimensionado de los dos dispositivos de cubrimiento (que podrían ser fabricados mediante la presente técnica).

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

4.1.1 Caracterización morfológica y analítica

4.1.1.1 SEM-EDX

4.1.1.1.1 Materias primas

Las partículas de aluminio presentan una forma elipsoidal y esférica con algunas protuberancias en la superficie, mientras que las partículas de CaCO_3 presentan una forma irregular y con un tamaño que oscila aproximadamente entre 1 micra y 40 micras (Figura 4.1).

En la Figura 4.1 se observan virutas de forma curvada de varios tamaños. Los espectros EDX de cuatro virutas identifican los mismos elementos químicos -Fe, Mn, Si y Co- en todos los espectros

con el siguiente % en peso promedio (y desviación estándar): 96,43 % (0,33 %), 1,62 % (0,06 %), 0,53 % (0,09 %), 0,65 % (0,07 %), respectivamente.

Tal y como establece la EN 10020, un acero aleado contiene un contenido de los elementos enumerados en la EN 10020 (Tabla 1) superior al valor límite indicado en la citada tabla.

En este caso, el cobalto superó ese valor límite (0,65 % en peso > 0,30 % en peso), lo que confirmó que las cuatro virutas analizadas se identifican como acero aleado, porque ni el cromo (que se encuentra en el acero inoxidable) estaba presente, ni el cobalto se encuentra comúnmente en el hierro fundido.

La Figura 4.1 también muestra el polvo de SMC que consta de partículas de diferentes tamaños y formas y algunas fibras. Estas partículas se identifican como partículas de resina y CaCO_3 según los espectros EDX (b2), (b4), respectivamente.

El espectro (b2) muestra un % en peso de 47,57 % y 37,89 % de carbono y oxígeno, respectivamente, así como aluminio (6,36 %) lo que indica que predomina un compuesto orgánico y que hay trazas de algún aditivo, por ejemplo, alúmina, utilizado para mejorar la resistencia al arco eléctrico del SMC [290].

La presencia de CaCO_3 se confirma en el espectro (b4), que muestra un porcentaje en peso de 17,92 %, 47,33 %, 33,77 % de carbono, oxígeno y calcio, respectivamente (según Davis [291], una formulación estándar de SMC puede contener hasta 40 % carbonato de calcio).

Los altos porcentajes de Si y O mostrados en el espectro (b1) confirman la naturaleza de las fibras. El área de análisis de espectro (b3) reúne diferentes partículas y una fibra.

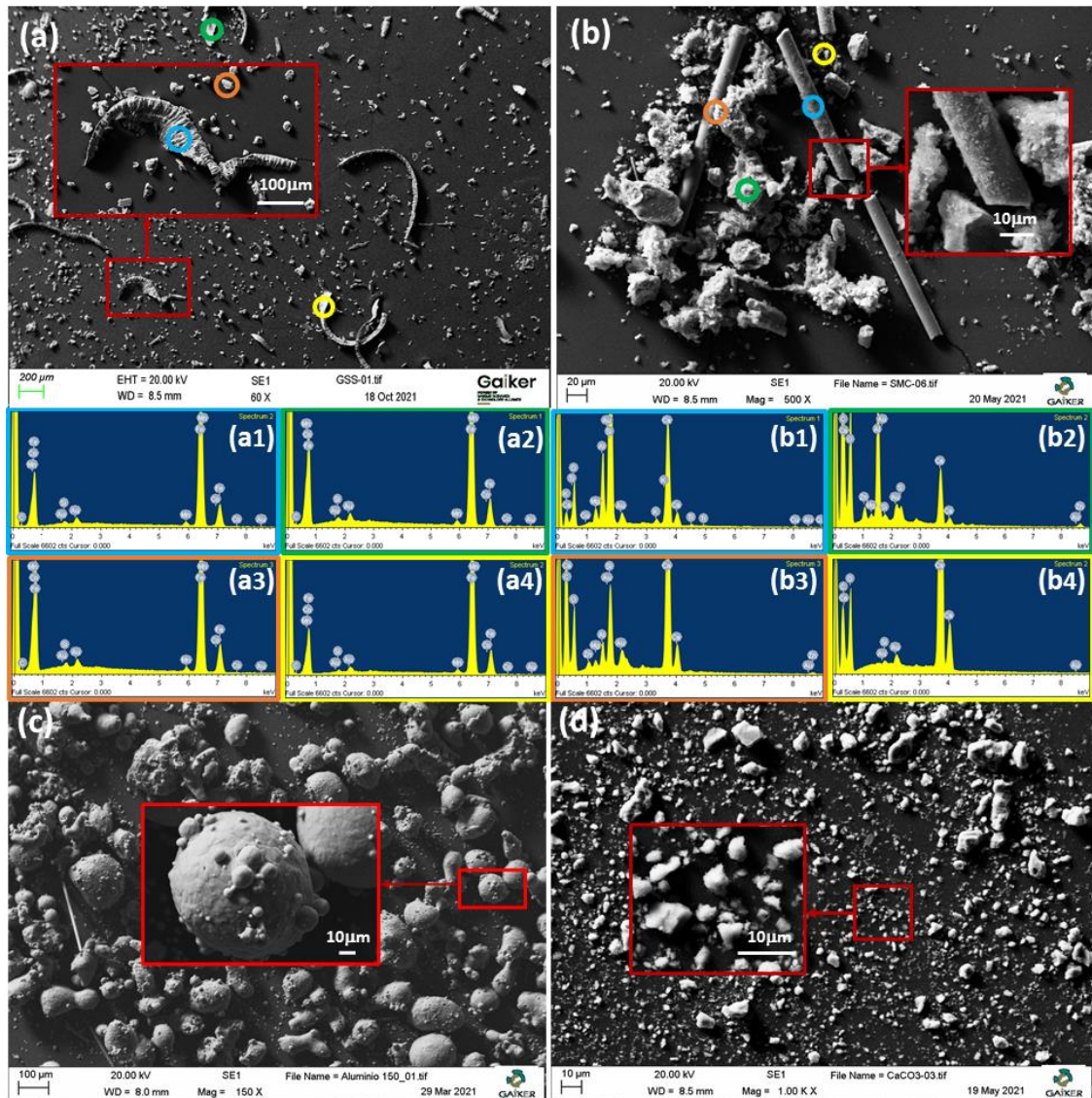


Figura 4.1 Micrografías SEM de partículas GSS (a), SMC (b), Al (c) y CaCO_3 (d) a diferentes aumentos. Espectros EDX de cuatro partículas de GSS (a1), (a2), (a3), (a4) y de SMC (b1), (b2), (b3), (b4) seleccionadas al azar.

4.1.1.1.2 Compuestos con 40% en peso carga

La Figura 4.2 muestra las observaciones SEM realizadas a los compuestos cargados con un 40 % de carga. Dichas observaciones muestran una buena distribución de partículas de GSS y aluminio y la presencia de un bajo porcentaje de poros en la matriz. Asimismo, estas micrografías SEM mostraron una dispersión de la carga homogénea (sin aglomerados significativos) en la matriz epoxi.

En el caso de los compuestos cargados con SMC y carbonato de calcio, puede observarse que los poros existentes son superiores tanto en número como en tamaño si se comparan con los compuestos 40GSS/4GA/EP y 40AL/4GA/EP. Además, estas micrografías SEM mostraron algunos

aglomerados de partículas de CaCO_3 y fibras en el compuesto 40SMC/4GA/EP (el color de las partículas de poliéster se confunde con el color de la matriz epoxi, dificultando así su identificación). Las fibras de vidrio (con forma alargada o elíptica y un diámetro de aproximadamente 10 micras) se distribuyeron homogéneamente en la matriz, y no se observaron espacios entre estos filamentos y la matriz (ni tampoco se observaron espacios entre las partículas y la matriz de los restantes tres tipos de compuestos metálicos y no metálicos) lo que confirmó que existía una buena interfase matriz-carga, indicando que la interacción entre los componentes fue satisfactoria.

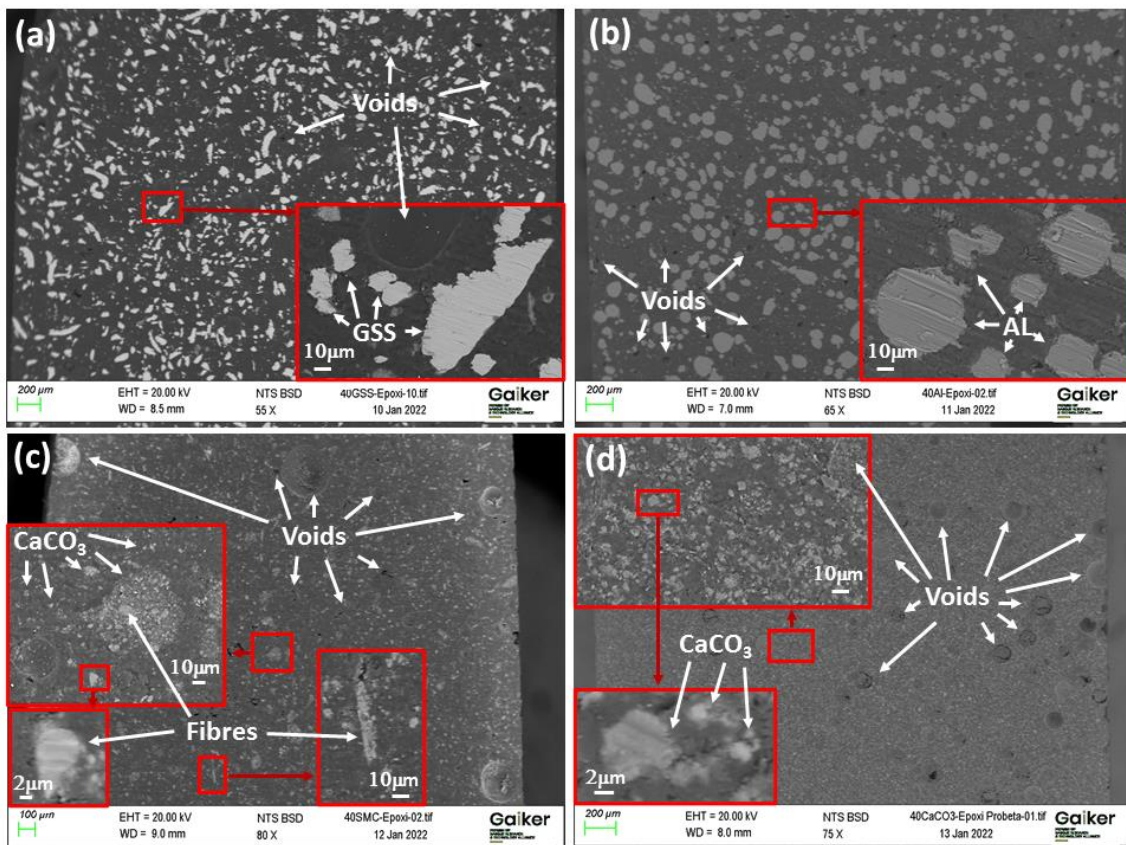


Figura 4.2 Micrografías SEM de 40GSS/4GA/EP (a), 40AL/4GA/EP (b), 40SMC/4GA/EP (c) y 40CaCO₃/4GA/EP (d) a diferentes aumentos.

4.1.1.1.3 Análisis de la sedimentación de la carga GSS

La Figura 4.3 muestra la observación realizada de la sección transversal de dos muestras (10GSS/4GA/EP y 10GSS/2GA/EP, sin tamizar) para el análisis de la sedimentación de estas cargas de alta densidad. Se puede observar cómo existe una mejora en la dispersión de la carga y una menor tendencia a la aglomeración de cargas con el aumento en el contenido de Garamite 7305.

En este sentido, el compuesto 10GSS/4GA/EP muestra una dispersión de GSS en la matriz epoxi bastante homogénea (sin aglomerados relevantes), mientras que el compuesto 10GSS/2GA/EP muestra una dispersión de partículas considerablemente inferior con numerosas partículas apiladas en la parte baja de la muestra, debido a que la resina no alcanzó una viscosidad suficiente con la cantidad de Garamite añadida.

En vista de los resultados obtenidos, es necesario añadir este agente tixotrópico en cantidades de al menos 4 % en peso, con el fin de aumentar suficientemente la viscosidad de la resina epoxi a velocidades bajas de cizallamiento y con ello reducir considerablemente la velocidad de sedimentación de las GSS.

Diferentes estudios, desarrollaron otras propuestas anti-sedimentación como, por ejemplo, el empleo de mayores cantidades de acelerador en la mezcla o mayor temperatura, para acelerar el proceso de curado de la matriz. Incluso, estas metodologías se han utilizado en conjunto con dispositivos anti-sedimentación especialmente diseñados para tal efecto [292].

Sin embargo, el enfoque novedoso que muestra esta investigación se basa en que no hay necesidad de un estudio completo del curado de la resina para definir la estrategia de fabricación, ni es necesario fabricar un dispositivo de sedimentación específico.

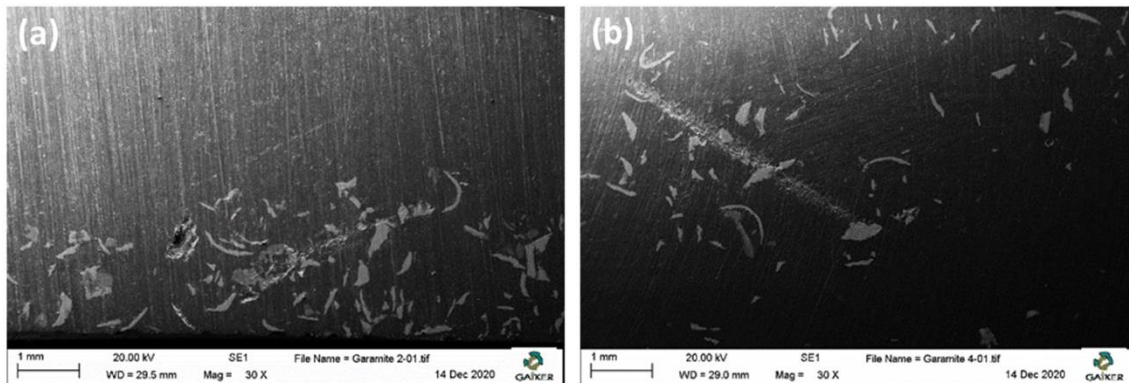


Figura 4.3 Micrografías SEM para el análisis de dispersión de las cargas GSS. (a) 10GSS/2GA/EP; (b) 10GSS/4GA/EP.

4.1.1.2 Densidad

4.1.1.2.1 Compuestos con carga metálica

El peso del molde y su manejabilidad están determinados por la densidad del material de construcción del molde. Así pues, de acuerdo con la Figura 4.4, un molde fabricado con

40GSS/4GA/EP será el molde más pesado, lo cual es lógico, debido a que la densidad del compuesto está determinada por la cantidad y densidad de la carga añadida [235]. Las ecuaciones de segundo orden (4) y (5) representan las líneas de tendencia de los valores predichos:

$$D_{\text{GSS}} = 2.0 \text{ E}^{-4} x^2 + 0.0083x + 1.11 \quad (4)$$

$$D_{\text{AL}} = 6.0 \text{ E}^{-5} x^2 + 0.0062x + 1.11 \quad (5)$$

Los valores predichos de las ecuaciones (4), (5) y los datos experimentales tienen una correspondencia relativamente buena. Por lo tanto, estos resultados corroboraron una buena distribución de partículas de GSS y Al y la presencia de un bajo porcentaje de poros (fracción de volumen <3,7 % en estos compuestos) en la matriz.

Estas declaraciones están de acuerdo con las observaciones SEM (Figura 4.2) porque los compuestos 40GSS/4GA/EP y 40AL/4GA/EP muestran un número reducido de poros (también en tamaño).

4.1.1.2.2 Compuestos con carga no metálica

La Figura 4.4 muestra el incremento de la densidad con el contenido de carga, donde el compuesto más denso es 40CaCO₃/4GA/EP. Esto es consistente con el hecho de que el SMC es menos denso que el carbonato de calcio, debido a que, el primero de ellos se compone, fundamentalmente, no solamente de carbonato de calcio, sino también de otros materiales más ligeros como son la resina poliéster y la fibra de vidrio. Esto confirma la afirmación de que la densidad del compuesto aumenta con la adición de carga y con la densidad de ésta [235].

Este incremento de la densidad de los compuestos se representa matemáticamente por las ecuaciones (5) y (6) correspondientes a los cálculos teóricos o predichos.

$$D_{\text{SMC}} = 6.0 \text{ E}^{-5} x^2 + 0.0018x + 1.00 \quad (5)$$

$$D_{\text{CaCO}_3} = 6.0 \text{ E}^{-5} x^2 + 0.0050x + 1.00 \quad (6)$$

Si se comparan las ecuaciones (5) y (6) con los datos experimentales, se observa una diferencia considerable, debido a su porcentaje relativamente alto de poros (hasta un 13,6 %). Las burbujas de aire atrapadas en los compuestos con cargas de naturaleza no metálicas se deben a que estas composiciones no se han introducido en la cámara de vacío, con objeto de obtener unos materiales con mejores prestaciones de aislamiento térmico. Dichos poros pueden observarse

en la Figura 4.2, que además son superiores tanto en número como en tamaño si se comparan con los compuestos 40GSS/4GA/EP y 40AL/4GA/EP.

4.1.2 Caracterización térmica de los compuestos

4.1.2.1 DSC

4.1.2.1.1 T_g

Se obtuvo la T_g de los compuestos conductores térmicos y de la resina sin carga, según se indica en la Tabla 4.1. La resina epoxi sin carga, muestra el valor de T_g más alto, mientras que el compuesto 40GSS/4GA/EP muestra la T_g más baja, lo que significa que la T_g del epoxi sin carga en comparación con los compuestos 40GSS/4GA/EP y 40AL/4GA/EP es un 3,3 % y 1,9 % más elevada, respectivamente.

De estos resultados se desprende que el grado de reticulación alcanzado por los tres materiales es relativamente similar. Esta diferencia puede deberse, probablemente, a una ligera humedad residual todavía presente en las cargas de aluminio y de acero, junto con alguna posible reacción de la resina epoxi con óxido de hierro en el caso del compuesto 40GSS/4GA/EP.

Tabla 4.1 T_g de los compuestos y de la resina sin carga.

Compuesto	T_g (°C)
EP	152,3
40GSS/4GA/EP	147,4
40AL/4GA/EP	149,4

4.1.2.1.2 Conductividad térmica

4.1.2.1.2.1 Compuestos con cargas metálicas

La Figura 4.4 muestra la conductividad térmica de la resina epoxi sin carga y de los compuestos cargados con partículas de aluminio y GSS hasta un 40 % en peso de carga.

El compuesto 40AL/4GA/EP presenta el valor de conductividad térmica más alto, $0,50 \pm 0,11$ $W(mk)^{-1}$, entre todos ellos, mientras que, el segundo valor más alto, $0,43 \pm 0,09$ $W(mk)^{-1}$, corresponde al compuesto 40GSS/4GA/EP. Este resultado es coherente con la literatura ya que la conductividad térmica de los compuestos está influenciada por la conductividad térmica y por el contenido de las cargas [293,294].

Cabe señalar que, cuando los moldes se someten a ciclos térmicos durante la producción de piezas, es deseable que el propio molde posea una elevada conductividad térmica. Esta preferencia está ligada al hecho de que un molde fabricado con un material de alta conductividad térmica producirá mejores piezas en términos de estabilidad dimensional, porque se minimiza el gradiente de temperatura en las superficies de moldeo. Además, este problema de variación de temperatura se magnifica cuando se moldean piezas delgadas (es decir, en tiempos de ciclo de moldeo cortos [295]), inconveniente que puede disminuir mediante un diseño mejorado de canales de calentamiento conformables (CCC).

4.1.2.1.2.2 Compuestos con cargas no metálicas

Si bien es deseable la construcción de moldes con materiales que presenten alta conductividad térmica para aquellos procesos de fabricación sometidos a ciclos térmicos, en el caso que se requiera un aislamiento térmico del molde, se prefieren, materiales que posean baja conductividad térmica, de modo que se minimice la pérdida de energía térmica al ambiente.

En este sentido, tanto la resina de poliéster como la fibra de vidrio (los principales componentes del SMC, junto con el carbonato de calcio) y la resina epoxi tienen una conductividad térmica menor que el carbonato de calcio [296]; Esto es coherente con lo que se muestra en la Figura 4.4, donde los compuestos de CaCO_3 /EP exhiben un aumento de su conductividad térmica con el contenido de CaCO_3 . Sin embargo, la pendiente de la línea de tendencia obtenida es menor que la que se muestra en otras investigaciones [296,297].

El hecho de que el compuesto posea cierto volumen de aire atrapado en su interior (la conductividad térmica del aire es $0,026 \text{ W/mk}$ [298]) puede ser la razón por la cual el aumento de la conductividad térmica con el contenido de CaCO_3 no es tan acusada como en otras investigaciones.

Por el contrario, la conductividad térmica de los compuestos de SMC/EP casi no se ve afectada con la adición de partículas de SMC, lo que podría indicar que no hay un porcentaje tan elevado de carbonato de calcio en la carga de SMC como podría pensarse. Además, la fibra de vidrio ayuda a contrarrestar la presencia de CaCO_3 , debido a que posee una conductividad térmica más baja ($0,04 \text{ W/mk}$ [299]) que los materiales restantes que componen el SMC.

En definitiva, cabe señalar que, para ambas familias de compuestos, los resultados obtenidos concuerdan con la literatura [293,294], ya que estas investigaciones indican que esta propiedad

térmica se ve afectada por la conductividad térmica de las cargas y por el contenido de éstas en el compuesto.

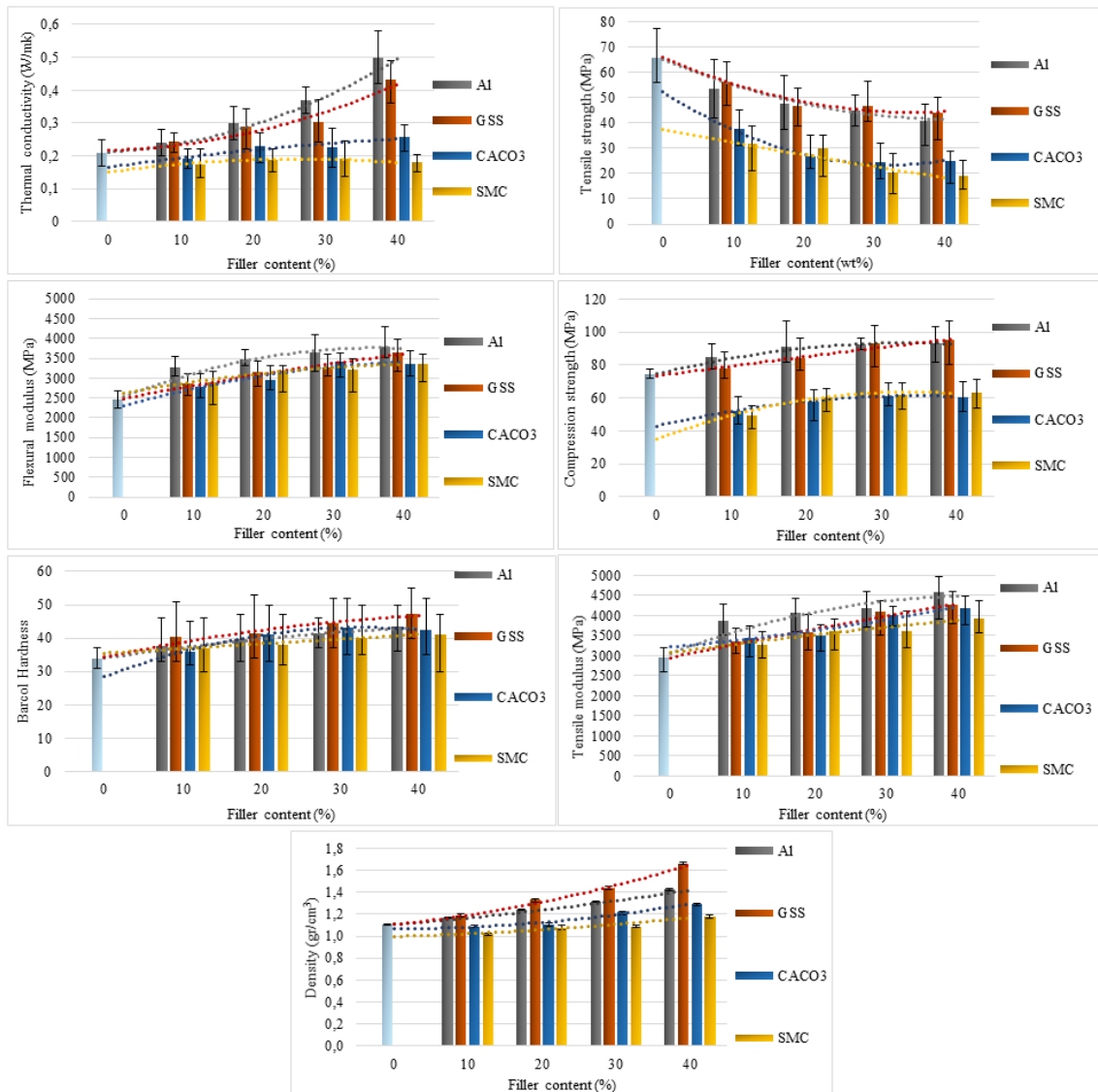


Figura 4.4 Propiedades térmicas, mecánicas y físicas de los compuestos GSS/EP, AL/EP, SMC/EP y CaCO₃/EP con diferente contenido de carga.

4.1.3 Caracterización mecánica de los compuestos

4.1.3.1 Ensayo de flexión

4.1.3.1.1 Compuestos con cargas metálicas

La Figura 4.4 muestra el aumento del módulo de flexión con el contenido de carga, lo cual coincide con la literatura [228], donde el compuesto 40AL/4GA/EP muestra el mayor módulo de flexión (3.800 ± 230 MPa) entre todos los compuestos, es decir, un módulo de flexión 14 % superior que el segundo más elevado, el compuesto 40GSS/4GA/EP (3.605 ± 270 MPa).

Cabe destacar que, cuando la curva AL/EP alcanza el 40 % en peso (22 % en volumen) del contenido de carga, parece que se ha alcanzado un máximo en la función matemática. Esta tendencia no se observa para la curva GSS / EP, probablemente porque la fracción de volumen de GSS para su correspondiente porcentaje en peso es menor que la del aluminio (por ejemplo, 9 % en volumen en el caso de 40 % en peso). Este comportamiento está de acuerdo con la regla de mezclas [293], donde el módulo elástico del material compuesto tiende a aumentar con la fracción de volumen y con el módulo elástico de la carga.

4.1.3.1.2 Compuestos con cargas no metálicas

La curva de tendencia de CaCO_3 /EP (Figura 4.4) alcanzó el máximo módulo con un contenido de carga del 30 % en peso (21 % en volumen), mientras que los compuestos SMC/EP apenas aumentaron su módulo de flexión más allá del 20 % en peso de contenido de carga. Estos comportamientos están de acuerdo con la regla de mezclas [293] donde el módulo del material compuesto tiende a aumentar con la fracción de volumen y con el módulo elástico de la carga. Sin embargo, cuando la carga añadida excede cierta fracción de volumen, aparentemente el módulo elástico se ve afectado negativamente.

4.1.3.2 Ensayo de tracción

4.1.3.2.1 Compuestos con cargas metálicas

La Figura 4.4 muestra la reducción de la resistencia a la tracción con el contenido de carga donde la resina epoxi sin carga posee la resistencia a la tracción más alta, entre todos los materiales, de acuerdo con otras investigaciones [159,228].

Hay que tener en cuenta que los defectos como las micro-grietas, los poros o las partículas agregadas, controlan las propiedades de tracción de los compuestos, ya que, éstos, introducen discontinuidades en el proceso de transferencia de fuerza a través de la interfaz carga-resina, creando debilidad estructural. Por lo tanto, se espera que la fracción de volumen de carga, la calidad de adhesión de la interfaz partícula-matriz, la tipología de mecanismo de reparto de carga y la resistencia mecánica de la propia carga, determinen cuantitativamente la resistencia a la tracción del compuesto.

Al igual que sucede con el módulo de flexión, el módulo de tracción (Figura 4.4) también aumenta con el contenido y el módulo elástico de la carga, lo cual es consistente con la literatura

[228,293]. Por lo tanto, a pesar del módulo elástico elevado del GSS, el compuesto 40AL/4GA/EP mostró el módulo de tracción más alto debido a su elevada fracción de volumen de carga.

4.1.3.2.2 Compuestos con cargas no metálicas

En este caso, los compuestos SMC/EP y CaCO_3 /EP presentan un mayor número de poros, debido a que no se introdujeron en la cámara de vacío para extraer las burbujas de aire atrapadas y lograr de esta forma disminuir la conductividad térmica.

Tal y como se ha indicado con anterioridad, la resistencia a tracción de un compuesto viene definida entre otros aspectos por la fracción en volumen de huecos y de carga. Esto justificaría la menor resistencia a tracción que, en general, presentan los compuestos SMC/EP y CaCO_3 /EP (Figura 4.4), respecto a otras investigaciones [159,228].

4.1.3.3 Ensayo de compresión

4.1.3.3.1 Compuestos con cargas metálicas

La Figura 4.4 también muestra el aumento de la resistencia a la compresión con el contenido de carga, ya que estas partículas contribuyen a aumentar la capacidad de absorción de carga del compuesto, en lugar de actuar como zonas de crecimiento de grietas como ocurre en un estado tensional de tracción. En el mecanismo de tensión por compresión, los defectos causados por la carga tienden a cerrarse, al contrario del mecanismo de apertura y crecimiento de grietas que ocurre bajo una carga de tracción.

Sin embargo, cuando la fracción en masa de carga supera el 20 % y el 30 % para el aluminio y GSS, respectivamente, se observa que la tensión máxima de compresión prácticamente no se incrementa. Este comportamiento también se ha encontrado en otras investigaciones [154,228], donde casi todos los compuestos mostraron la máxima resistencia a compresión antes de alcanzar una fracción en masa del 40 %.

La diferencia en la fracción de volumen de carga entre los compuestos de aluminio y GSS (a igualdad de fracción en masa de carga) y una posible saturación de la carga, es decir, de defectos en la sección transversal de la probeta, podría conducir a una disminución de la capacidad de absorción de carga en compresión; de modo que, esta puede ser la razón por la que los compuestos de aluminio casi alcanzaron la resistencia máxima a la compresión en una fracción en masa menor que los compuestos de GSS.

4.1.3.3.2 Compuestos con cargas no metálicas

La Figura 4.4 muestra el incremento de la resistencia a la compresión con el contenido de SMC y CaCO_3 . Sin embargo, como se ha indicado anteriormente y como también lo reflejan otras investigaciones [154,228], la máxima resistencia a la compresión de los compuestos no aumenta a partir de cierto contenido de carga. En concreto, para esta tipología de cargas (SMC y CaCO_3), a partir de aproximadamente un 30 % en peso de carga se puede observar que la máxima resistencia a compresión tiende a mantenerse en ambos casos.

De modo que, parece que un exceso de carga (o defectos) en los compuestos no da como resultado una mejora en la capacidad de absorción de carga por compresión. Este hecho, puede ser la razón por la que tanto los compuestos de SMC/EP como los de CaCO_3 /EP alcancen su máxima resistencia a la compresión antes del 40 % en peso de carga.

4.1.3.4 Ensayo de dureza

4.1.3.4.1 Compuestos con cargas metálicas

La dureza de los compuestos basados en resina epoxi es un parámetro relevante, debido a que afecta a la durabilidad y a la vida útil del molde [154], porque la dureza está relacionada con la resistencia al desgaste [232]. La Figura 4.4 muestra el resultado de dureza Barcol, donde el compuesto 40GSS/4GA/EP (47 ± 4) muestra el valor más alto (mayor que su homólogo con carga de aluminio), lo que confirma que la dureza aumenta con el contenido y la dureza de la carga [235].

4.1.3.4.2 Compuestos con cargas no metálicas

La Figura 4.4 muestra, en general, un ligero aumento de la dureza del barcol con el contenido de carga. El SMC se compone principalmente de una resina termoestable, CaCO_3 y fibra de vidrio de corta longitud [91]. Considerando que el CaCO_3 presenta una mayor dureza que la resina de poliéster, pero inferior que la fibra de vidrio, se justifica que los valores de dureza sean similares entre los compuestos de SMC y CaCO_3 , lo que demuestra que la dureza del compuesto está influenciada por la dureza y contenido de la carga [235].

4.1.4 Análisis de costes y selección del compuesto

4.1.4.1 Análisis de costes

4.1.4.2 Compuestos con cargas metálicas

El coste por kilogramo de cada compuesto se muestra en la Tabla 4.2. Tal y como puede advertirse, el compuesto más económico se corresponde con la composición 40GSS/4GA/EP, que logra una reducción de coste del 42 % en comparación con su homólogo en aluminio. Es obvio que cuanto más carga se añade al sistema de resina (siendo ambas cargas más económicas que el sistema de resina), más barata es la mezcla; además, este efecto se potencia cuando la carga tiene coste cero.

Tabla 4.2 Coste por kilogramo de las ocho mezclas conductores térmicas.

Contenido en peso (%)	10	20	30	40
AL / EP	9,92 €/kg	9,54 €/kg	9,16 €/kg	8,78 €/kg
GSS/EP	9,27 €/kg	8,24 €/kg	7,21 €/kg	6,18 €/kg

Este ahorro se refleja claramente en el coste de la materia prima necesaria para la fabricación de cuatro tamaños de molde diferentes (Tabla 4.3 y Figura 4.5). Se puede observar que, cuanto más grande sea el molde, mayor será el ahorro, lo cual es obvio, por lo que, si se seleccionara el compuesto 40GSS/4GA/EP para la fabricación del molde en lugar del compuesto 40AL/4GA/EP, se obtendría una reducción en el coste por materia prima de 9.025 €.

Tabla 4.3 Coste de materia prima para fabricar los moldes 40GSS/4GA/EP y 40AL/4GA/EP.

Tipo de molde	Pequeño (60 dm ³)	Medio (500 dm ³)	Grande (1700 dm ³)	Muy grande (4000 dm ³)
40AL/4GA/EP	750 €	6.251 €	21.254 €	50.010 €
40GSS/4GA/EP	615 €	5.123 €	17.418 €	40.985 €

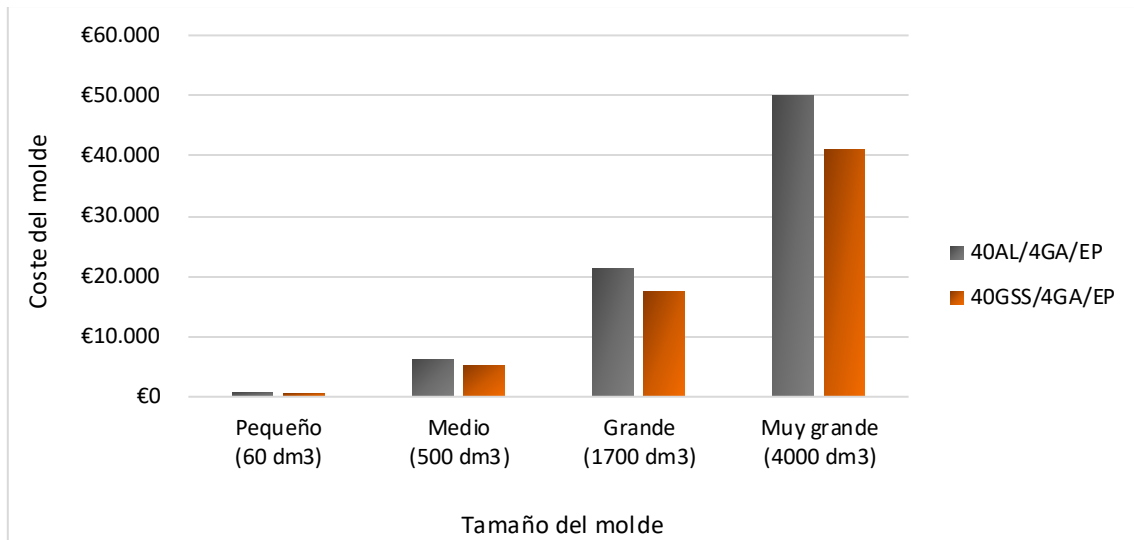


Figura 4.5 Comparación de coste entre los moldes 40GSS/4GA/EP y 40AL/4GA/EP

4.1.4.3 Compuestos con cargas no metálicas

La Tabla 4.4 muestra la reducción del coste por kilogramo de los compuestos, con el contenido de carga, debido al bajo coste o coste cero de las cargas de CaCO_3 y SMC, respectivamente. Aunque el compuesto más barato es el 40SMC/4GA/EP, el compuesto 40 CaCO_3 /4GA/EP es solo un 5 % más caro que el compuesto más económico. La misma tendencia se muestra para las partículas de GSS y Al, donde los compuestos GSS/EP y AL/EP también muestran una reducción del coste por kilogramo con la adición de cargas, logrando 6,18 €/kg y 8,78 €/kg, respectivamente, cuando se alcanza el 40 % en peso. Cabe señalar que, a pesar de que el coste por kilo (o masa) de los compuestos 40GSS/4GA/EP y 40SMC/4GA/EP son semejantes, la composición 40SMC/4GA/EP es aún más competitiva económicamente, ya que, si el costo se calcula por unidad de volumen, en vez de por unidad de masa, el segundo compuesto es un 22 % más económico que el primero.

Tabla 4.4 Coste por kilogramo de las ocho mezclas conductoras térmicas.

Contenido en peso (%)	10	20	30	40
CaCO_3 /EP	9,34 €/kg	8,38 €/kg	7,42 €/kg	6,46 €/kg
SMC/EP	9,27 €/kg	8,24 €/kg	7,21 €/kg	6,18 €/kg

Estos costes se utilizan para calcular el gasto repercutido por materia prima para fabricar dos tipos de moldes y cuatro tamaños de moldes diferentes (Tabla 4.5 y Figura 4.6). En este sentido, el molde fabricado en 40GSS/4GA/EP - 40SMC/4GA/EP consigue un ahorro de coste del 39 %

respecto del molde 40AL/4GA/EP, lo que supone una reducción de gasto de 14.028 € para un molde muy grande.

Tabla 4.5 Costo de materia prima para fabricar los moldes 40GSS/4GA/EP- 40SMC/4GA/EP y 40AL/4GA/EP.

Tipo de molde	Pequeño (60 dm ³)	Medio (500 dm ³)	Grande (1700 dm ³)	Muy grande (4000 dm ³)
40AL/4GA/EP	750 €	6.251 €	21.254 €	50.010 €
40GSS/4GA/EP – 40SMC/4GA/EP	540 €	4.498 €	15.293 €	35.982 €

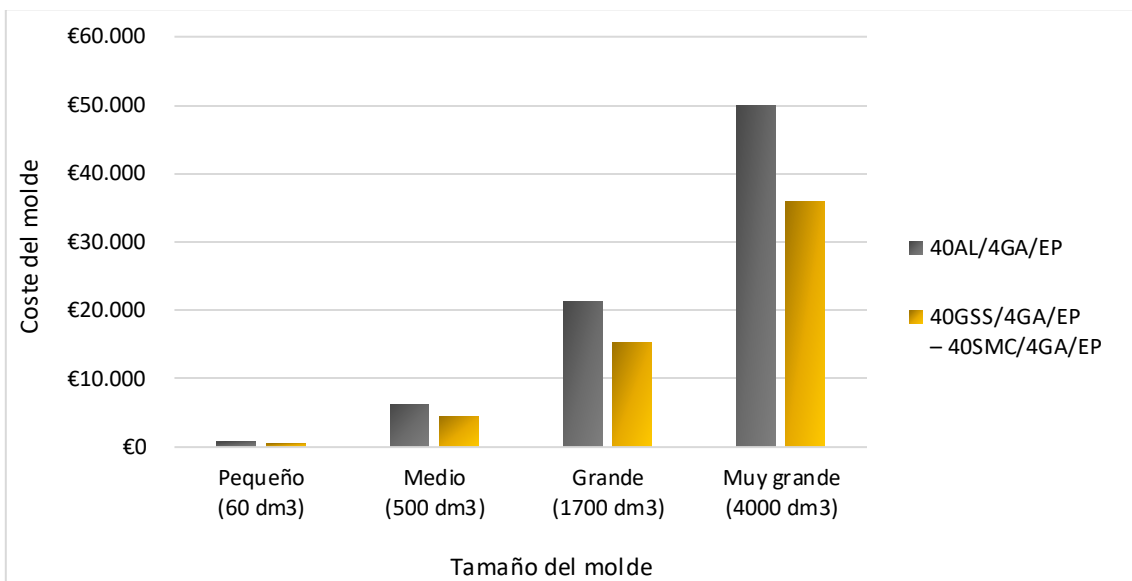


Figura 4.6 Comparación de coste entre los moldes 40GSS/4GA/EP- 40SMC/4GA/EP y 40AL/4GA/EP

4.1.4.4 Selección del compuesto para la fabricación del molde con residuos conductores térmicos

La Tabla 4.6 se utilizó para seleccionar el compuesto más ventajoso para la fabricación de moldes de tamaño mediano a grande. Esta matriz de clasificación seleccionó los compuestos 40GSS/4GA/EP y 40AL/4GA/EP como el primer y segundo compuestos más favorables, respectivamente.

Las mayores ventajas de la composición 40GSS/4GA/EP son su bajo coste y su elevada dureza, con una mejora del 29,6 % y 8,5 %, respectivamente, respecto a la mezcla 40AL/4GA/EP. Por el contrario, el compuesto 40AL/4GA/EP supera a la primera opción en todas las propiedades restantes.

Tabla 4.6 Matriz de valoración para la selección del compuesto para la zona interior del molde.

Propiedad	Densidad (g/cm ³)		Resistencia a tracción (MPa)		Módulo de flexión (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)		Dureza		Conductividad térmica (w/mk)		Coste (€/kg)		Valoración
	2	A	3	B	3	C	2	D	2	E	4	F	5	G	
Especimen ID	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	2(1-A)+3B+3C+2D+2E+4F+5(1-G)
10GSS/4GA/EP	1,19	0,71	56,10	1,00	2855	0,75	78,00	0,82	40	0,86	0,24	0,48	9,27	0,93	11,44
20GSS/4GA/EP	1,33	0,80	46,70	0,83	3145	0,83	84,20	0,89	41	0,88	0,29	0,58	8,24	0,83	12,08
30GSS/4GA/EP	1,44	0,87	46,60	0,83	3279	0,86	93,30	0,98	44	0,95	0,30	0,60	7,21	0,73	12,97
40GSS/4GA/EP	1,66	1,00	44,00	0,78	3654	0,96	94,90	1,00	47	1,00	0,43	0,86	6,18	0,62	14,56
10AL/4GA/EP	1,17	0,70	53,60	0,96	3280	0,86	84,60	0,89	37	0,80	0,24	0,48	9,92	1,00	11,35
20AL/4GA/EP	1,24	0,75	47,60	0,85	3460	0,91	90,80	0,96	39	0,85	0,30	0,60	9,54	0,96	11,98
30AL/4GA/EP	1,31	0,79	45,00	0,80	3650	0,96	92,10	0,97	41	0,88	0,37	0,74	9,16	0,92	12,74
40AL/4GA/EP	1,42	0,86	40,80	0,73	3800	1,00	93,30	0,98	43	0,92	0,50	1,00	8,78	0,89	13,85

Abs. Valor absoluto

W. Valor ponderado

4.1.4.5 Selección del compuesto para la fabricación del molde con residuos conductores y no conductores térmicos

La Tabla 4.7 o matriz de evaluación, se utilizó para elegir el compuesto más favorable para la fabricación de una barrera térmica para un molde de tamaño mediano o grande. Ésta, selecciona las composiciones 40SMC/4GA/EP y 30SMC/4GA/EP como el primer y segundo material más ventajoso, respectivamente.

Los beneficios más notables de la composición 40SMC/4GA/EP radican en su baja conductividad térmica y densidad, que son inferiores en un 30,1 % y 9,0 %, respectivamente, en comparación con el compuesto 40CaCO₃/4GA/EP. Por el contrario, respecto a las propiedades de resistencia a tracción y dureza, la mezcla 40CaCO₃/4GA/EP es superior a su homóloga con carga de SMC.

Tabla 4.7 Matriz de valoración para la selección del compuesto para la barrera térmica del molde.

Propiedad	Densidad (g/cm ³)		Resistencia a tracción (MPa)		Módulo de flexión (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)		Dureza		Conductividad térmica (w/mk)		Coste (€/kg)		Valoración 2(1-A)+3B +3C+D+E +5(1-F)+5(1-G)
	2	A	3	B	3	C	1	D	1	E	5	F	5	G	
Especimen ID	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	Abs.	W.	
10SMC/4GA/EP	1,02	0,79	31,6	0,84	2889	0,85	49,1	0,78	37	0,86	0,18	0,68	9,27	0,99	8,75
20SMC/4GA/EP	1,08	0,84	29,9	0,80	3169	0,93	60,2	0,95	38	0,88	0,19	0,73	8,24	0,88	9,28
30SMC/4GA/EP	1,09	0,84	20,4	0,54	3219	0,94	61,9	0,98	40	0,93	0,19	0,75	7,21	0,77	9,10
40SMC/4GA/EP	1,17	0,91	19,2	0,51	3369	0,99	63,1	1,00	41	0,95	0,18	0,70	6,18	0,66	9,83
10CaCO ₃ /4GA/EP	1,09	0,84	37,5	1,00	2780	0,82	52,1	0,83	36	0,84	0,19	0,74	9,34	1,00	8,71
20CaCO ₃ /4GA/EP	1,11	0,86	26,8	0,71	2950	0,87	57,9	0,92	41	0,95	0,23	0,89	8,38	0,90	7,98
30CaCO ₃ /4GA/EP	1,22	0,94	24,5	0,65	3410	1,00	61,1	0,97	43	1,00	0,23	0,88	7,42	0,79	8,68
40CaCO ₃ /4GA/EP	1,29	1,00	24,8	0,66	3366	0,99	60,8	0,96	43	1,00	0,26	1,00	6,46	0,69	8,45

Abs. Valor absoluto

W. Valor ponderado

4.2 DISEÑO DE MOLDES Y PRUEBAS DE MOLDEO

4.2.1 Simulaciones térmicas

Se obtiene que, el circuito de calentamiento embebido en el molde 40GSS/4GA/EP - 40SMC/4GA/EP requiere un consumo de energía (o potencia) menor (59,9 W) que el molde fabricado enteramente en 40GSS/4GA/EP (71,2 W), debido a que disipa más calor al ambiente.

Ello, se justifica con el hecho de que las paredes exteriores del molde fabricado en 40GSS/4GA/EP presentan una temperatura superior respecto de las paredes del molde fabricado en 40GSS/4GA/EP - 40SMC/4GA/EP (Figura 4.7 y Figura 4.8), lo cual indica que el molde con barrera térmica (fabricada en 40SMC/4GA/EP) mantiene de una forma más eficiente la energía calorífica en su interior.

Asimismo, el molde con barrera térmica presenta un gradiente de temperatura menor en la superficie de moldeo (Figura 4.8 y Figura 4.9), ya que, todas las paredes en contacto con el material de moldeo se sitúan a una temperatura superior a 110 °C, mientras que en el molde monomaterial se sitúan por encima de 90 °C. El hecho de que el gradiente de temperatura en las superficies de moldeo sea reducido favorece la calidad dimensional de la pieza a fabricar [91].

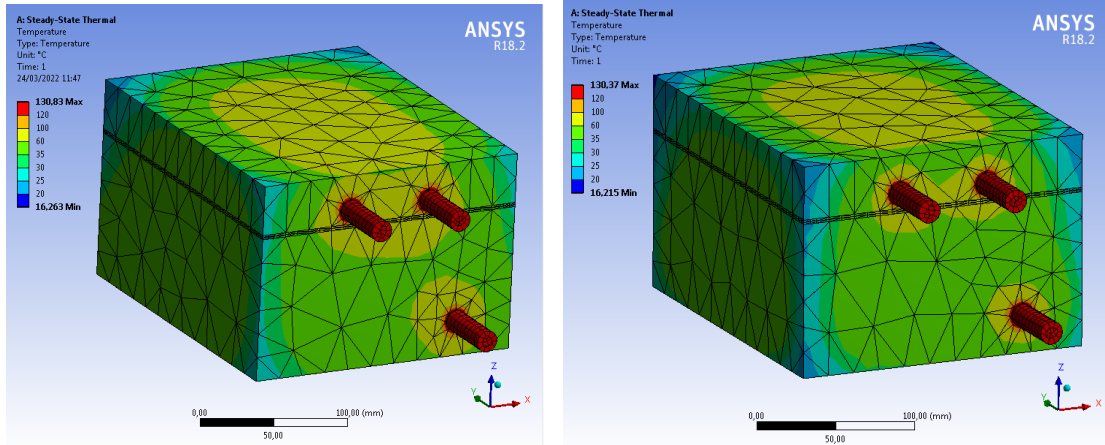


Figura 4.7 Temperatura en las caras exteriores del molde 40GSS/4GA/EP (izquierda), y del molde 40GSS/4GA/EP - 40SMC/4GA/EP (derecha).

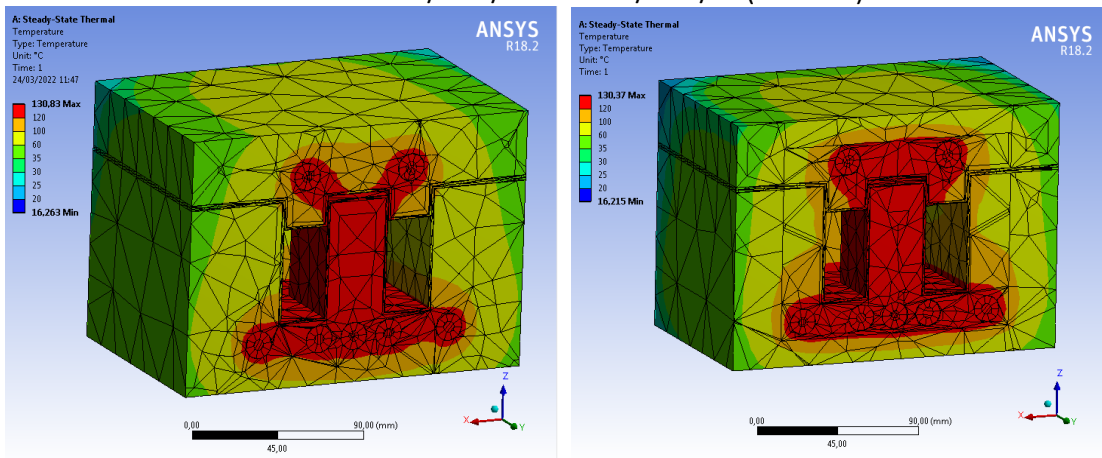


Figura 4.8 Temperatura en una sección interior del molde 40GSS/4GA/EP (izquierda), y del molde 40GSS/4GA/EP - 40SMC/4GA/EP (derecha).

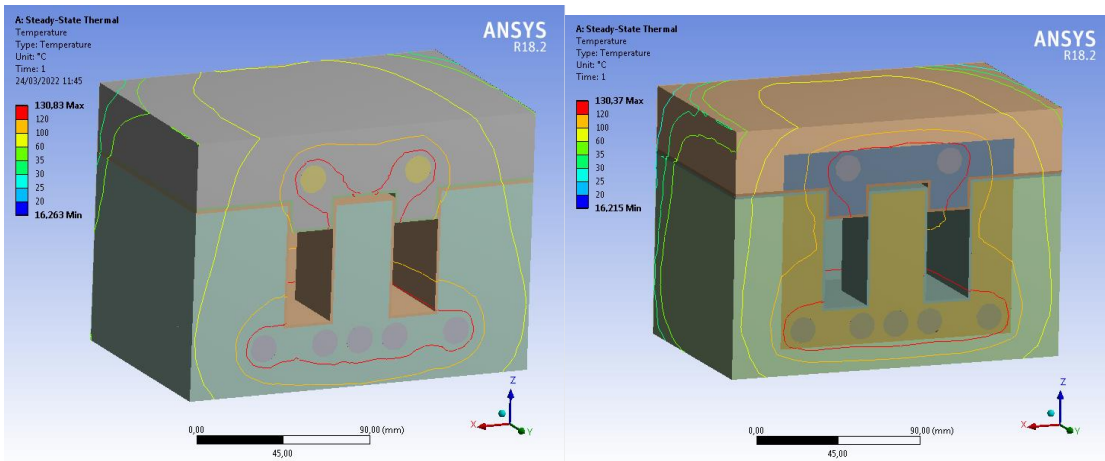


Figura 4.9 Temperatura (isolíneas) en una sección interior del molde 40GSS/4GA/EP (izquierda), y del molde 40GSS/4GA/EP - 40SMC/4GA/EP (derecha).

4.2.2 Pruebas de moldeo preliminares

Se realizaron pruebas de moldeo con el molde conceptual fabricado mediante la estrategia segunda (Figura 3.22). La estrategia primera de fabricación fue desechada (Figura 3.20) debido a que no es posible extraer los moldes epoxídicos de los modelos de FDM. Por el contrario, si fue sencillo extraer los moldes de la funda de silicona (estrategia segunda).

En la Figura 4.10 se muestra como el preimpregnado ha fluido ligeramente a través de las paredes verticales del cierre del molde. Este material se puede eliminar fácilmente tras expulsar la pieza. La compactación y el acabado superficial es adecuado, ya que copia perfectamente la superficie de la funda de silicona. Asimismo, no se observan alabeos relevantes en la pieza.

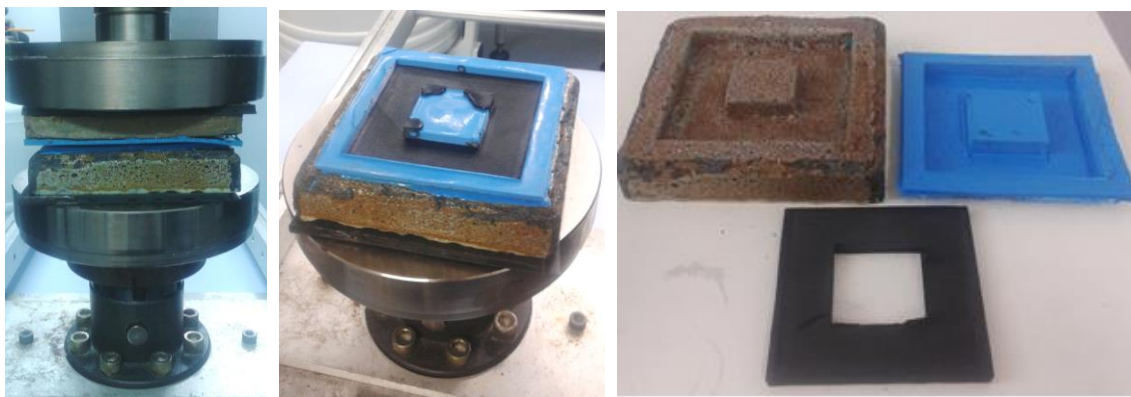


Figura 4.10 Prensado y desmoldeo del preimpregnado de fibra corta.

En la segunda prueba, se moldea el preimpregnado de tejido (Figura 4.11), a la misma temperatura y presión de moldeo que en el caso anterior. En este caso, el preimpregnado apenas ha fluido entre las paredes verticales del cierre del molde, debido a que el formato de refuerzo continuo dificulta el flujo del material en el molde, al contrario que ocurre con el preimpregnado de fibra corta. La compactación ha sido buena, así como, el acabado superficial y las desviaciones dimensionales (o alabeos) dentro de lo aceptable.



Figura 4.11 Introducción del laminado de fibra continua en el molde y desmoldeo de la funda y pieza.

Por último, se moldea el laminado mixto (Figura 4.12), es decir, mitad del espesor de la pieza con preimpregnado de tejido de vidrio y la otra mitad con preimpregnado de fibra corta de vidrio.

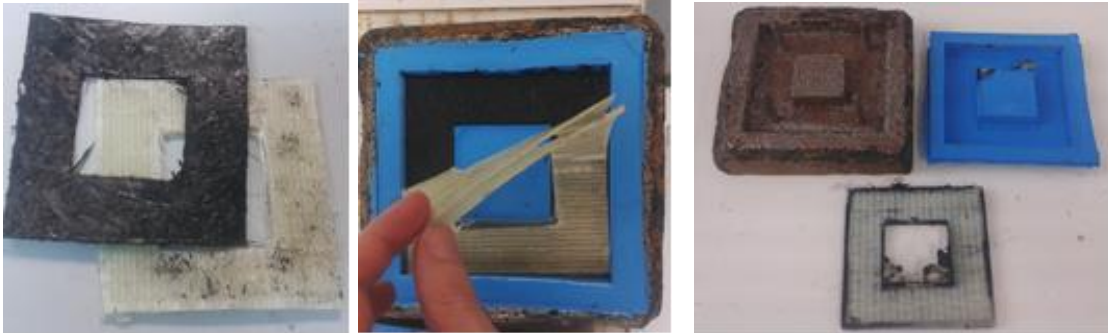


Figura 4.12 Patrones de preimpregnado de fibra corta y continua introducidos en el molde y desmoldeo de la pieza.

Al igual que en el moldeo del preimpregnado de fibra corta, ha fluido una pequeña cantidad de material por los intersticios (sin embargo, menos que en el primer moldeo), creando unas rebabas, que se han podido eliminar fácilmente.

La pieza moldeada, al igual que en los moldeos anteriores presenta unas desviaciones dimensionales dentro de lo aceptable y visualmente, la compactación ha sido buena, al igual que, la unión de los dos materiales.

En definitiva, mediante esta prueba de moldeo básica, se verifica que, es posible (al menos a pequeña escala) fabricar moldes empleando compuestos de resina y residuos metálicos y emplearlos para moldeo de preimpregnados.

Asimismo, la técnica de emplear fundas de silicona es favorable, en tanto en cuanto, facilita la fabricación del molde y desmoldeo de la pieza, así como, proporciona un acabado liso en la superficie de moldeo, que no se consigue empleando solo el compuesto resina-viruta en la superficie del molde.

4.2.3 Pruebas de moldeo

Con el primer molde fabricado enteramente en 40GSS/4GA/EP se realizan pruebas de moldeo, con objeto de conocer el comportamiento del molde cuando se le somete a unas condiciones particulares de presión y temperatura.

La presión mínima para obtener piezas de buena calidad fue de 0,2MPa, debido a que presiones más bajas conducen a que la pieza se consolide (la resina polimeriza y endurece) antes de que

ocurra una compactación adecuada de las capas. La presión requerida depende de la cantidad y naturaleza de las cargas, aditivos y refuerzos, así como de la temperatura de moldeo, el espesor de la pieza y la complejidad geométrica de la pieza [300]. De modo que, al moldear por debajo de dicha presión, se producen y se observan diferentes defectos de moldeo: alabeo de la pieza, líneas de soldadura, y falta de llenado de la pieza (Figura 4.13).

Por el contrario, cuando la presión de moldeo excede de 0,9 MPa, comienzan a aparecer rebabas considerables en las piezas moldeadas, debido a que la separación de las paredes verticales del cierre del molde (1,5 mm) es considerablemente mayor que la holgura típica de 0,06-0,10 mm diseñada para moldes de producción de acero [301]. El molde fue diseñado con esta holgura para evitar cualquier riesgo de fricción entre los moldes hembra y macho durante el cierre, debido al relativo elevado coeficiente de dilatación térmica de la silicona, respecto del acero y a la precisión dimensional relativamente baja de los modelos fabricados por la tecnología de impresión FDM.

Aun así, se podría rediseñar y volver a fabricar un molde con una distancia de cierre ligeramente menor; sin embargo, no se advierte ninguna ventaja en aumentar la presión por encima de 0,9 MPa para moldear estas piezas gruesas, ya que éstas, no poseen un acabado texturizado, ni superficies complejas a copiar como pueden ser nervios, etc., que en ese caso si requerirán una mayor presión de moldeo según el grado de complejidad de estas geometrías [91].

Así pues, teniendo en cuenta las presiones de moldeo típicas con moldes de acero de 10-15 MPa [91] y la presión registrada en estos ensayos (0,2 MPa), se puede afirmar que la presión necesaria para moldear estas piezas correctamente es 50 veces menor que la presión de moldeo estándar. Además, según la literatura [302], esta presión puede disminuir aún más, hasta un 60-70 % si el compuesto de moldeo se precalienta, por ejemplo, mediante microondas (una tecnología ventajosa a la hora de calentar apilamientos de elevado grosor, ya que el calentamiento se realiza volumétricamente en vez de superficialmente como lo harían otras técnicas). De esta forma, el compuesto de moldeo reblandecido fluirá más fácilmente, debido a la considerable reducción de su viscosidad que conducirá a una mejor calidad de la pieza, especialmente cuando se molde en piezas de geometría compleja.

Por ejemplo, moldear una pieza de un área proyectada de 0.44 m² con una presión de 15 MPa requiere una prensa de 660 toneladas, mientras que moldearla con una presión de 0,2 MPa, solo requeriría una prensa de 9 toneladas. Como resultado de ello, se podrían utilizar prensas

de bajo tonelaje, como una prensa neumática de 9 toneladas, que es una solución mucho más económica, ya que además podría utilizar la presión de aire estándar de la planta de 6,9 bares. Así pues, considerando que las prensas de compresión típicas varían entre 100 y 5000 toneladas, esta técnica de moldeo podría usarse para la fabricación de piezas de mayor tamaño que la técnica estándar, es decir, mayores de 3 m² [137].

Esta reducción de presión de moldeo a 0,2 MPa y 0,9 MPa es posible debido a la aplicación de una metodología en la que el material de moldeo se coloca en aproximadamente el 80 % de la superficie de moldeo, en lugar de en los porcentajes de colocación típicos (que se sitúan por debajo del 40 %) [303].

Esta estrategia minimiza el riesgo de rotura de la funda de silicona, debido a que se reduce considerablemente el flujo del SMC dentro del molde, y con ello las solicitaciones mecánicas a soportar por la funda. Este aspecto es crítico, ya que, la silicona presenta una resistencia a la tracción relativamente baja, que además que se ve afectada negativamente por la temperatura [304].

Otras ventajas adicionales que presenta moldear con una mayor superficie de moldeo es que se reduce el grado de anisotropía de la pieza moldeada, lo que afecta favorablemente a la contracción, a las tensiones residuales y a los alabeos de la pieza [91].

No obstante, es necesario tener especial cuidado cuando la superficie de moldeo esté ocupada en un porcentaje cercano al 100 %, debido a que, si el aire no se evacua adecuadamente del molde, el aire ocluido en la pieza podría generar defectos superficiales e incluso delaminaciones de la pieza moldeada [305].

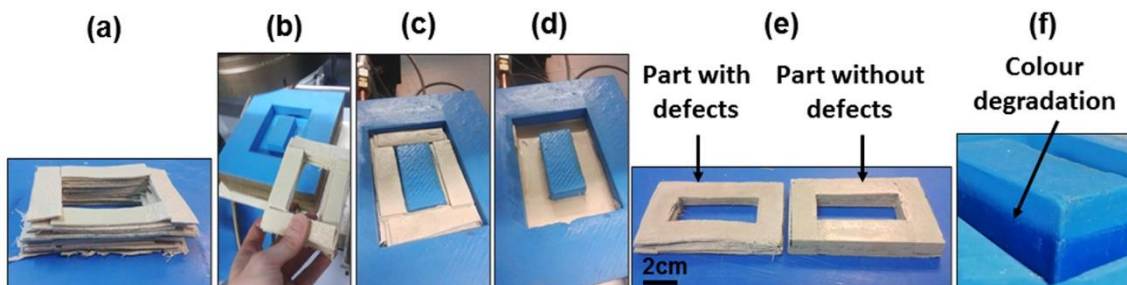


Figura 4.13 Pruebas de moldeo. (a) Apilamiento del preimpregnado. (b) Introducción manual del apilamiento. (c) Apilamiento antes del moldeo. (d) Apilamiento después del moldeo. (e) Piezas moldeadas. (f) Degradación del color de la funda de silicona.

En cuanto al sistema de desmoldeo desarrollado, la funda de silicona de 4 mm de espesor fue extraída (con cierto esfuerzo) del molde hembra sin ningún mecanismo de desmoldeo complejo y costoso, a pesar de la longitud del núcleo interno. La funda de silicona más delgada (de 2 mm de espesor) se desgarró después de moldear 23 piezas, mientras que la funda más gruesa prolongó su vida útil hasta la obtención de 100 piezas, a pesar de que se observó cierta pérdida de elasticidad y degradación del color (Figura 4.13), lo que probablemente podría llegar a provocar la rotura de la funda después de ciertos moldeos. Posiblemente, el preimpregnado poliéster empleado (debido a su contenido en estireno) afecte negativamente a la funda de silicona [306].

Por lo tanto, el espesor de la funda de silicona posee una considerable relevancia, ya que se somete a una fuerza de desgarro sustancial durante la extracción, y la resistencia al desgarro de la silicona disminuye drásticamente con la temperatura y pérdida de elasticidad [304]. De modo que, si se requieren fabricar más de cien piezas, probablemente sería necesario volver a fabricar las fundas de silicona; por lo tanto, se debe registrar el peso de cada colada de silicona de la primera funda fabricada, para garantizar la repetibilidad de las siguientes fundas a fabricar.

Una vez extraída del molde la funda de silicona con la pieza, la pieza moldeada se puede retirar fácilmente de la funda, debido a que, ésta evita cualquier tipo de adherencia mecánica del preimpregnado a las porosidades que emergen en la superficie del molde (Figura 4.14). Este problema también fue encontrado por otros investigadores [169,170] donde a pesar de aplicarse un desmoldeante a base de silicona a la superficie de moldeo, no se resolvieron completamente los problemas de desmoldeo. Además, se produce una adhesión química entre el preimpregnado y el molde cuando la superficie del molde alcanza una temperatura cercana a la T_g de la resina. Si por causas extraordinarias el molde pudiera sobrecalentarse, entonces el uso de estas cubiertas evita este problema.

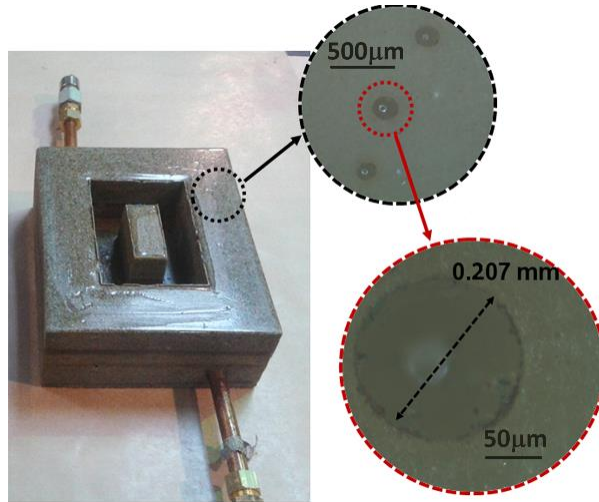


Figura 4.14 Observaciones de la porosidad superficial del molde con un microscopio óptico.

4.2.4 Pruebas de moldeo monitorizadas

La Figura 4.15 muestra las temperaturas registradas en dos localizaciones (durante ocho horas) de los moldes con (40GSS/4GA/EP - 40SMC/4GA/EP) y sin barrera térmica (40GSS/4GA/EP). El termopar ubicado en la entrada de aceite de ambos moldes registró variaciones de temperatura de tipo diente de sierra entre aproximadamente 130 °C y 110 °C a lo largo del tiempo.

El termopar colocado en el molde con barrera térmica, registró datos que indicaban que los períodos de encendido y apagado del calentador de aceite duraban 3,8 minutos y 24,7 minutos (línea verde), respectivamente, mientras que el termopar ubicado en el molde sin barrera térmica, indicó que los periodos de encendido y apagado tuvieron una duración de 4,1 minutos y 20,6 minutos (línea azul), respectivamente.

Por lo tanto, el número de veces que se enciende la resistencia del calentador de aceite, para mantener el molde con barrera térmica a aproximadamente 120 °C, es inferior que el número de veces necesario para mantener a dicha temperatura el molde sin aislamiento térmico. Como resultado de ello, el período de tiempo, durante una jornada laboral, en el que la resistencia del calentador de aceite está funcionando, es superior para el molde sin barrera térmica, lo que resulta en un mayor consumo de energía.

De alguna manera, este efecto se ve respaldado por el hecho de que la temperatura de los termopares ubicados en la zona exterior del molde con barrera térmica (línea púrpura) registra una temperatura más baja que la del molde no aislado térmicamente (línea roja). Esto quiere decir que la energía en forma de calor se mantiene en el volumen que encierra la barrera

térmica, concretamente en ese volumen elaborado con el compuesto 40GSS/4GA/EP. Como resultado, se produce una menor disipación de calor del molde al ambiente y, en consecuencia, se requiere un menor consumo de energía.

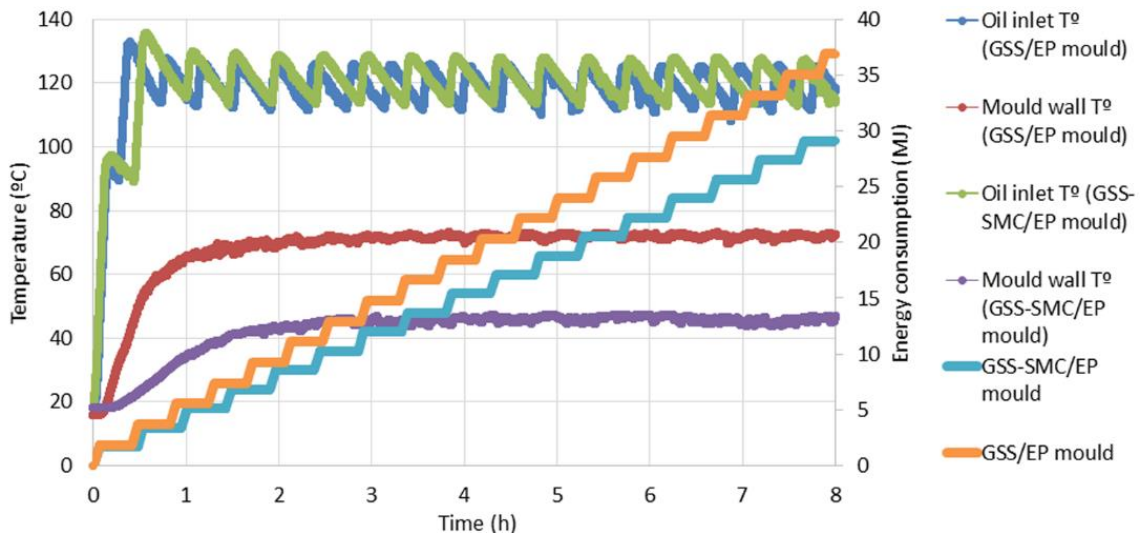


Figura 4.15 Temperaturas registradas y consumo de energía de los moldes **GSS/EP** (sin barrera térmica) y **GSS-SMC/EP** (con barrera térmica).

4.2.5 Ejemplo de aplicación: diseño del dispositivo de cubrimiento

4.2.5.1 Modelo C250

Para el dimensionado del dispositivo de cubrimiento 60 x 30 x 3 cm C250, se comenzó diseñando un modelo sencillo con ranuras rectas (Figura 4.16). Este modelo tiene un espesor de 3 cm y presenta un vaciado de un 30 % de la abertura libre mediante diez ranuras, atendiendo a las dimensiones de anchura y longitud que permite la norma EN 124.

La evolución del diseño del modelo C250 hasta alcanzar el diseño estructuralmente apto se muestra en la Figura 4.16. En el segundo modelo diseñado, se modifica la geometría de las ranuras haciendo que dichas ranuras tengan una anchura mayor en la zona central que en los extremos. En el tercer diseño, se modifica ligeramente el diseño de las ranuras, suavizando las aristas vivas, mediante radios de acuerdo. Mientras que, en el cuarto diseño, se incluye un refuerzo longitudinal y en el quinto diseño se incluye un refuerzo adicional, incrementando además el espesor de éste.

El tercero y sucesivos diseños se basan en un incremento de espesor del dispositivo de cubrimiento, que se gana por debajo del marco de apoyo, mediante el uso de preimpregnado de viniléster-epoxi con *mat* de fibra de vidrio (sumado al preimpregnado de tejido biaxial de

vidrio que se utiliza por encima del marco de apoyo), ya que, este material presenta una capacidad de flujo dentro del molde, superior a su homólogo de fibra continua y con ello permite el aumento del espesor del dispositivo en zonas localizadas, al contrario que el preimpregnado de fibra continua.

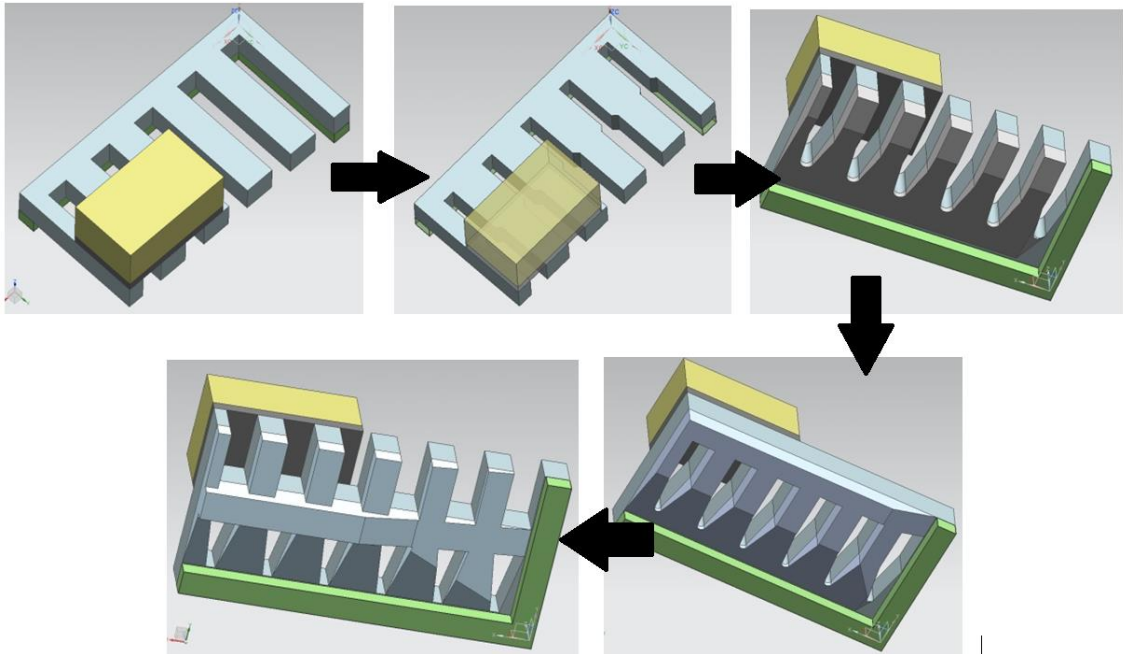


Figura 4.16 Evolución del diseño del modelo 60x30x3 cm C250, junto con el indentador y el marco de apoyo (un cuarto de modelo).

Para verificar que los diseños son capaces de superar la carga establecida, los valores de tensión obtenidos del cálculo estructural (Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19) se comparan con las constantes de resistencia del preimpregnado ortótropo y con la constante de resistencia del preimpregnado cuasi-isótropo. De esta forma, se prevé si el dispositivo de cubrimiento supera la carga establecida y si lo supera, con que margen de seguridad. Asimismo, se obtiene una representación gráfica del desplazamiento esperado, que indica un desplazamiento máximo de 3,4 mm en la zona central (Figura 4.19).

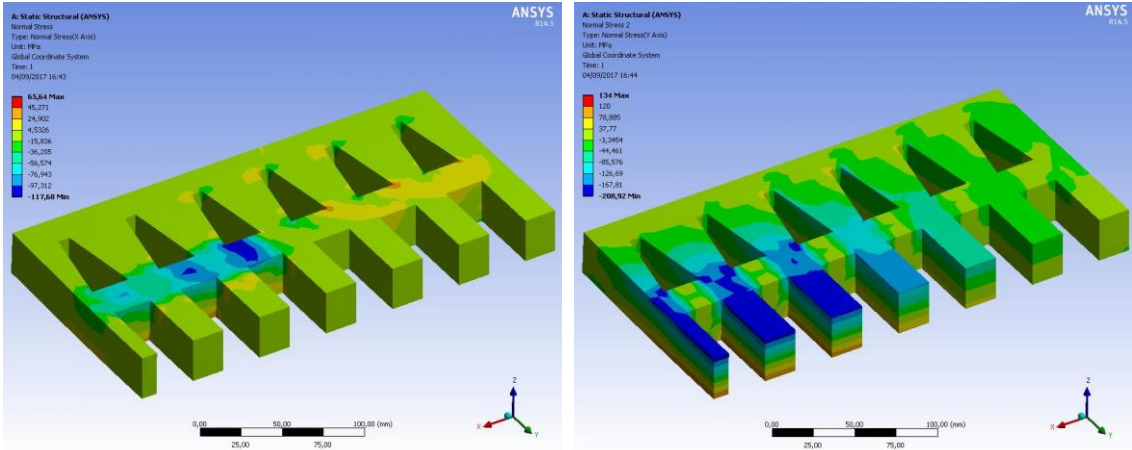


Figura 4.17 Tensión normal S_1 (izquierda) y tensión normal S_2 (derecha) del laminado ortótropo. Un cuarto del modelo.

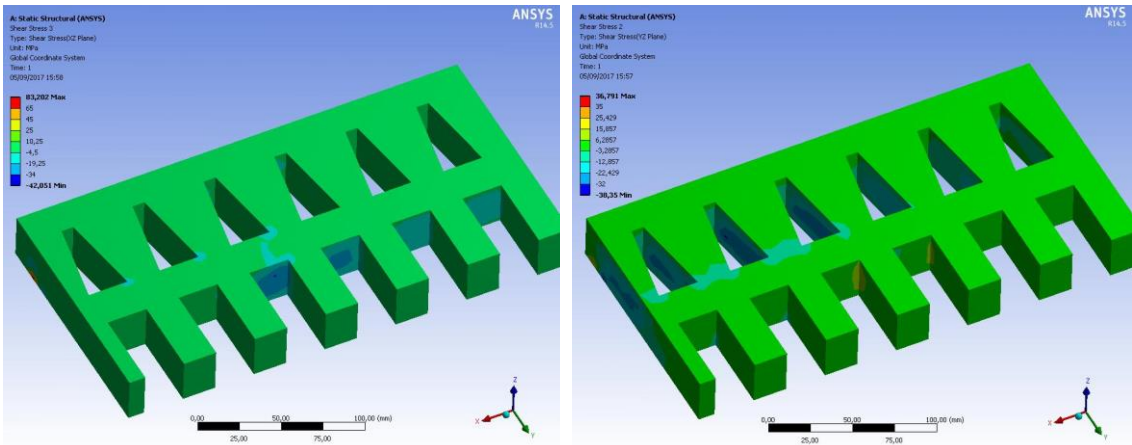


Figura 4.18 Tensión de cortadura S_{13} (izquierda) y tensión de cortadura S_{23} (derecha) del laminado ortótropo. Se representa una cuarta parte del modelo.

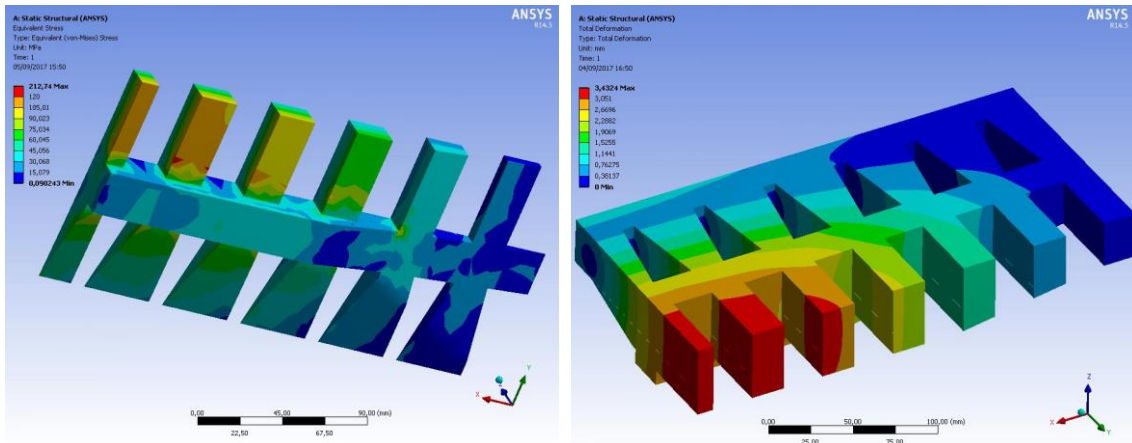


Figura 4.19 Tensión Von Mises del laminado cuasi-isótropo (izquierda) y desplazamiento del dispositivo de cubrimiento (derecha). Un cuarto del modelo.

Tabla 4.8. Coeficiente de seguridad del último diseño del dispositivo C250.

<i>Tensiones obtenidas (MPa)</i>	<i>Tensiones admisibles (MPa)</i>	<i>Coeficiente de seguridad</i>
$S_1 = 118$	$X_t = X_c = 336$	$CS_1 = 2,9$
$S_2 = 209$	$Y_t = Y_c = 336$	$CS_2 = 1,6$
$S_{13} = 34$	$S = 37$	$CS_{13} = 1,1$
$S_{23} = 32$	$S = 37$	$CS_{23} = 1,2$
$\sigma_{vm} = 120$	$R_T = 152$	$CS_{vm} = 1,3$

Tal y como se indica en la Tabla 4.8, el dispositivo de cubrimiento comenzaría a fracturarse a partir de una carga ligeramente superior a 250 kN, debido a que la tensión de cortadura interlaminar (S_{13}) presenta un valor muy cercano a la resistencia interlaminar a rotura del compuesto ortótropo (S). La tensión cortante máxima se localiza entre el cuarto y quinto nervio rectangular (comenzando desde la esquina), en concreto, tras la zona común de contacto indentador-dispositivo. Asimismo, la tensión de cortadura S_{23} máxima se localiza en los dos nervios piramidales situados inmediatamente detrás del indentador. Esto es coherente con el hecho de que la tensión de cortadura es nula entre los puntos de aplicación de carga (en un ensayo de flexión de cuatro puntos) y que además el máximo se localiza en el centro del espesor de la estructura o en el plano neutro del nervio [307].

Las tensiones más elevadas en el material cuasi-isótropo se localizan en los tres nervios centrales situados debajo del indentador y su magnitud es prácticamente idéntica a lo largo de dichos nervios, debido a que el momento flector se mantiene constante tal y como describe la literatura [307].

Por último, las máximas tensiones normales S_1 en el laminado de fibra continua, se localizan en la zona superior del dispositivo de cubrimiento que está en contacto con el canto del indentador. Esta tensión de compresión se debe en gran medida a la flexión que se genera en el nervio longitudinal y que es igualmente elevada en toda la longitud del nervio que se sitúa por debajo del indentador. Asimismo, las máximas tensiones normales S_2 (compresión en la cara superior y tracción en la cara inferior) se localizan en los tres nervios transversales que se sitúan por debajo del indentador (donde la magnitud del momento flector se mantiene constante), manteniendo la coherencia con lo identificado en el caso de S_1 y con la bibliografía [307].

4.2.5.2 Modelo D400

Para el dimensionado del dispositivo de cubrimiento 60 x 60 x 6 cm D400, se inició con el diseño de un modelo con ranuras rectas (Figura 4.20). El modelo tiene un espesor de 6 cm y presenta un vaciado de un 30 % de la abertura libre mediante dieciocho ranuras, atendiendo a las dimensiones de anchura y longitud (para una colocación tipo 1). En el segundo modelo diseñado (Figura 4.20), se modifica la geometría y el número de las ranuras, así como, la adición de otro nervio en una dirección ortogonal a las ranuras.

En el tercer y último diseño (Figura 4.20), se incrementa el espesor del dispositivo de cubrimiento por debajo del marco de apoyo, mediante el uso del preimpregnado reforzado con *mat* de fibra de vidrio. Este mismo material se emplea en la mitad del espesor de la zona superior de la rejilla, de modo que, la zona intermedia del dispositivo se diseña con preimpregnado de tejido continuo.

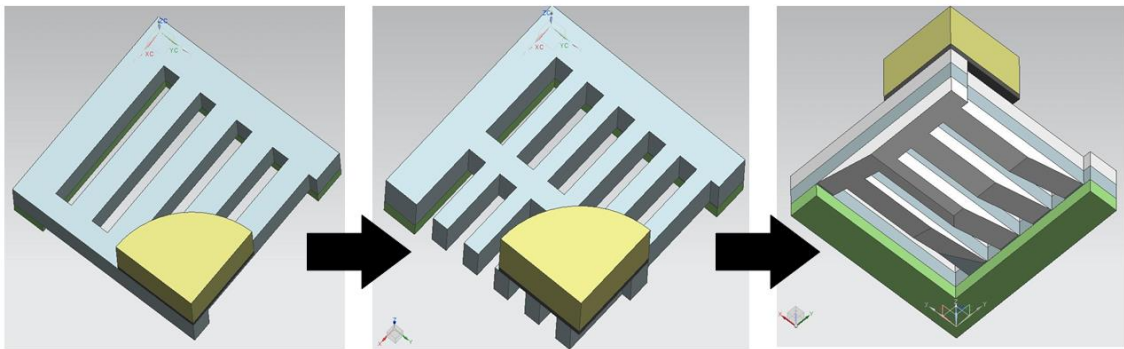


Figura 4.20 Evolución del diseño del modelo 60x60x6cm D400, junto con el indentador y el marco de apoyo (se representa una cuarta parte del modelo).

Al igual que en el modelo C250, se verifica si el último diseño D400 es capaz de superar la carga de 400 kN (y con que coeficiente de seguridad), mediante comparación de los valores de tensión obtenidos del cálculo estructural (Figura 4.21, Figura 4.22 y Figura 4.23) con las constantes de resistencia del preimpregnado ortótropo y con la constante de resistencia del preimpregnado cuasi-isótropo. Asimismo, se obtiene una representación gráfica del desplazamiento esperado, que indica un desplazamiento máximo de 6,1 mm en la zona central (Figura 4.23).

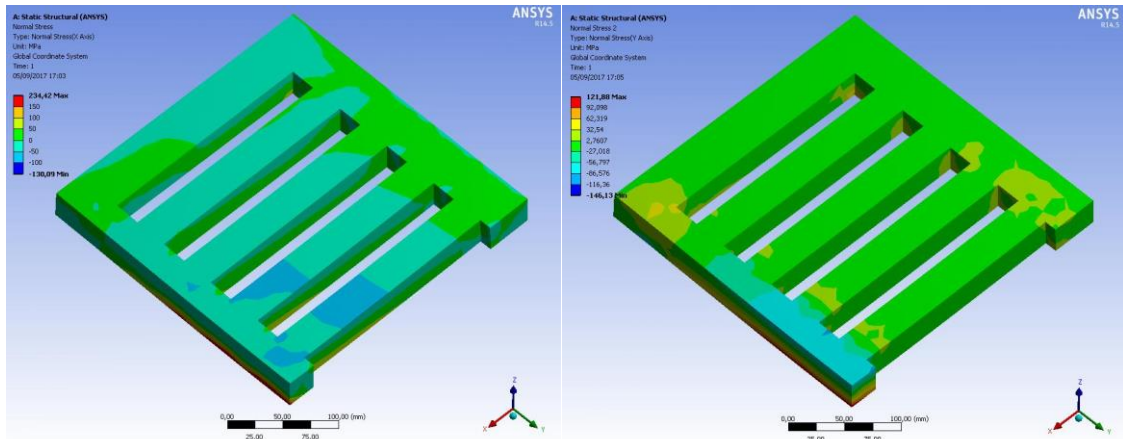


Figura 4.21 Tensión normal S_1 (izquierda) y tensión normal S_2 (derecha) del laminado ortótropo. Se representa una cuarta parte del modelo.

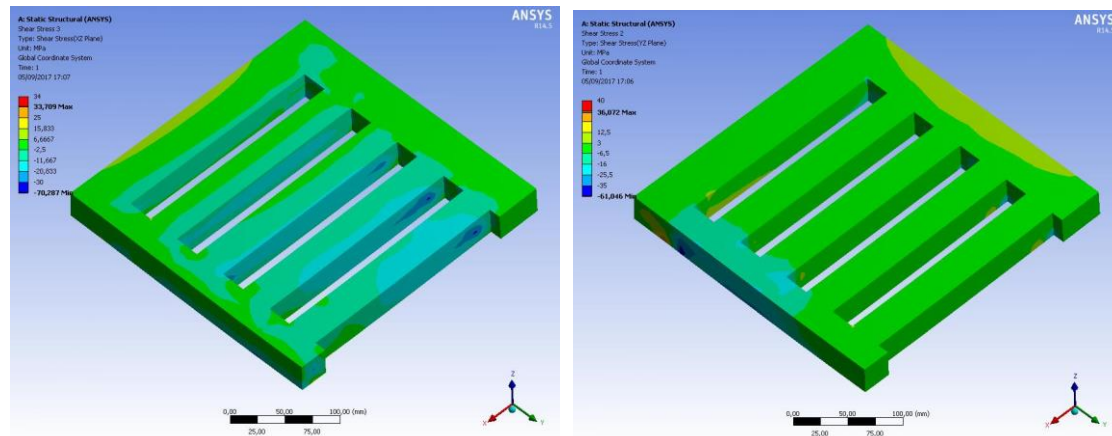


Figura 4.22 Tensión de cortadura S_{13} (izquierda) y tensión de cortadura S_{23} (derecha) del laminado ortótropo. Se representa una cuarta parte del modelo.

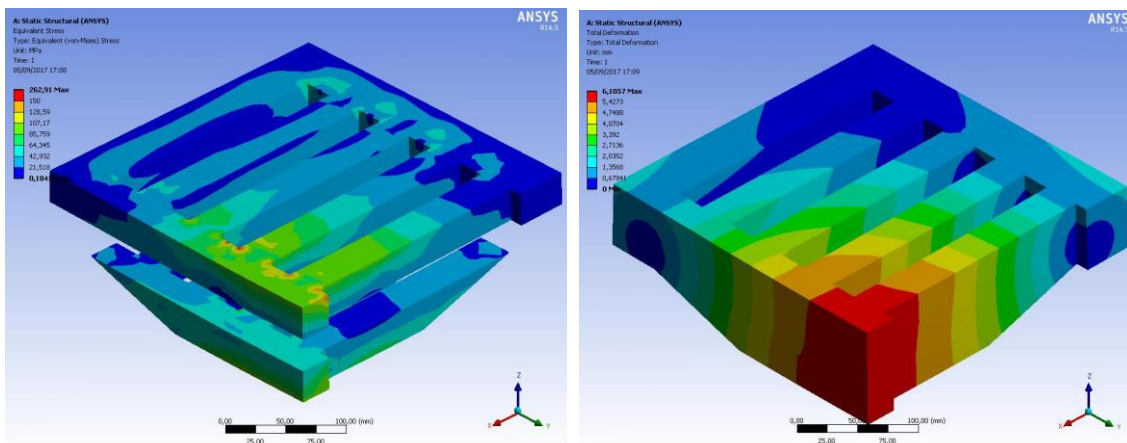


Figura 4.23 Tensión Von Mises del laminado cuasi-isótropo (izquierda) y desplazamiento del dispositivo de cubrimiento (derecha). Se representa una cuarta parte del modelo.

Tabla 4.9. Coeficiente de seguridad del último diseño del dispositivo D400.

Tensiones obtenidas (MPa)	Tensiones admisibles (MPa)	Coeficiente de seguridad
$S_1 = 234$	$X_t = X_c = 336$	$CS_1 = 1,4$
$S_2 = 122$	$Y_t = Y_c = 336$	$CS_2 = 2,8$
$S_{13} = 30$	$S = 37$	$CS_{13} = 1,2$
$S_{23} = 35$	$S = 37$	$CS_{23} = 1,1$
$\sigma_{vm} = 150$	$R_T = 152$	$CS_{vm} = 1,0$

De la Tabla 4.9, se obtiene que el dispositivo de cubrimiento comenzaría a fracturarse a una carga de 400 kN, debido a que la tensión Von Mises (σ_{vm}) prácticamente iguala el valor de resistencia a rotura del laminado cuasi-isótropo (R_T) cuando se aplica dicha carga. La máxima tensión Von Mises se localiza en la superficie superior del dispositivo, en concreto en las aristas de intersección entre los nervios centrales transversales y el nervio longitudinal. La zona del dispositivo que comprende el área de contacto indentador-dispositivo se mantiene, prácticamente, con un momento flector constante, y además, parece producirse unas concentraciones de tensiones en las mencionadas aristas, que podrían reducirse mediante radios de acuerdo.

Cabe decir que, el mínimo coeficiente de seguridad obtenido (1,0), no significa que al alcanzar la carga de 400 kN suceda el fallo catastrófico del dispositivo de cubrimiento, sino que éste, probablemente, comenzaría a fracturarse y el laminado ortótropo, en este caso, asumiría la responsabilidad de evitar el fallo total de la pieza hasta que se alcance un valor de fuerza determinado.

Sin embargo, en este caso, para situarse del lado de la seguridad se prefiere dimensionar el dispositivo de cubrimiento mediante el criterio de Rotura de primera lámina (*first-ply failure*) en vez de mediante el criterio de Rotura de última lámina o (*last-ply failure*) [308].

La tensión cortante máxima S_{23} , que debería, mantenerse constante a lo largo del nervio longitudinal (en la zona central del espesor o plano neutro) se localiza al comienzo de dicho nervio. Ello es debido a que el espesor del nervio se incrementa (mediante el aporte del compuesto reforzado con *mat*) conforme se acerca a la zona de aplicación de la carga. La tensión cortante, alcanza el valor nulo por debajo del área de aplicación de la carga [307].

Asimismo, la tensión cortante S_{13} se advierte en los dos nervios centrales transversales (en la zona central del espesor). Al igual que ocurre con la tensión cortante máxima S_{23} , la tensión máxima S_{13} se localiza al comienzo de dichos nervios, debido a que, es la zona con menor espesor de nervadura.

Por último, las máximas tensiones normales (tracción) S_1 y S_2 en el laminado de fibra continua, se localizan en la zona inferior de dicho laminado, ambas localizadas en el nervio longitudinal, cerca de la zona central del dispositivo y debajo del área de aplicación de la carga (donde existe un momento flector constante).

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Del presente trabajo se desprenden las siguientes conclusiones y líneas de investigación futuras.

5.1 CONCLUSIONES

- El mecanizado (de metal y de GFRP) es uno de los métodos más utilizados para el postprocesado de piezas y para la fabricación de utillajes, por lo que a la vista de los resultados obtenidos y la gran disponibilidad de estos residuos, tanto las partículas de GSS como las de SMC podrían utilizarse como fuente de materia prima (y como un sustituto del polvo comercial de aluminio y del CaCO_3) para la fabricación de moldes, lo cual es una estrategia eficaz para valorizar estos desechos y, por lo tanto, evitar el agotamiento de los recursos naturales.
- Se propone una solución eficaz para evitar la sedimentación de cargas de alta densidad en matrices termoestables utilizando un aditivo con propiedades anti-sedimentación. Esta solución es más sencilla que el uso de aceleradores o un dispositivo anti-sedimentación (no disponible comercialmente) que requieren una medición del tiempo de polimerización muy precisa.
- Los compuestos 40GSS/4GA/EP y 40SMC/4GA/EP son los más ventajosos para la fabricación de moldes. Por un lado, el 40GSS/4GA/EP tiene un 8,5 % más de dureza, y cuesta un 29,6 % menos que su homólogo de aluminio (40AL/4GA/EP) lo que se traduce en moldes más económicos, y en consecuencia, en una clara ventaja para la fabricación de lotes reducidos de producción. Por otro lado, el 40SMC/4GA/EP es el compuesto más ventajoso para dotar al molde de una barrera térmica eficaz, debido a que, su conductividad térmica y coste por kilo es 30,1 % y 4,3 %, respectivamente, inferior al compuesto 40CaCO₃/4GA/EP.
- La funcionalidad del molde fabricado se ha probado empíricamente para el proceso de moldeo por compresión en caliente, lo que demuestra que los compuestos desarrollados pueden soportar las condiciones de moldeo. Además, el método de colocación del preimpregnado sobre una superficie de moldeo determinada, evita la rotura de la funda de silicona y permite moldear a presiones más bajas, ampliando así el alcance de la técnica al moldeo de piezas de mayor tamaño y el uso de prensas de menor tonelaje y consumo eléctrico.

- El uso de fundas de silicona en las superficies de moldeo es un método útil y eficiente para posibilitar el desmoldeo de piezas incluso con núcleos internos profundos. Además, contribuye a evitar el uso de complejos y costosos mecanismos de desmoldeo que aumentan considerablemente el coste del molde, haciendo económicamente más rentable su utilización para la fabricación de lotes de producción reducidos.
- Los dos dispositivos de cubrimiento dimensionados se adaptan a las capacidades y ventajas que posee la técnica desarrollada de fabricación de moldes, debido a que, ambos presentan una geometría compleja para su desmoldeo en un escenario de producción de pequeñas series. Asimismo, mediante un diseño y una combinación de preimpregnados adecuado, son teóricamente capaces de superar la carga establecida sin superar en altura a su homólogo en fundición de hierro.
- El molde con barrera térmica requiere un 27 % menos de electricidad que el molde sin barrera térmica durante una rutina de moldeo de ocho horas. Este ahorro se logró gracias a la implementación de una pared aislante térmica construida en el compuesto 40SMC/4GA/EP. Además, este molde también es económicamente competitivo, debido a que, muestra un ahorro de costes del 39 % en comparación con el molde 40AL/4GA/EP. Este resultado se previó en las simulaciones térmicas realizadas previamente donde el consumo del molde sin la barrera térmica se incrementaba en un 19 %.

5.2 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Las investigaciones realizadas sobre la técnica *epoxy tooling*, son interdisciplinarias, debido a que integran los ámbitos de conocimiento de la tecnología de fabricación, la ingeniería, la sostenibilidad y la ciencia de materiales. En este sentido, se identifican los posibles futuros trabajos de investigación en este campo:

- Los moldes epoxi tienen como objetivo adquirir cada vez más características de los utillajes *hard tooling*. Este objetivo requiere de un incremento de las prestaciones de los utillajes epoxi; de modo que, es importante aumentar las propiedades mecánicas y térmicas, debido a que la calidad dimensional de la pieza y el tiempo de ciclo se encuentran entre algunas de las características que están directamente influenciadas por las propiedades térmicas del molde. La robustez del molde, que afecta a los diseños con nervaduras y paredes delgadas, está influenciada por las propiedades mecánicas.

- El éxito en la aplicación de la tecnología *epoxy tooling* en el proceso de fabricación del moldeo por compresión en caliente, lleva a pensar que podría ser posible extender esta técnica a otro tipo de procesos de fabricación. El alto coste de los moldes de acero convencionales es un obstáculo importante para ciertas tecnologías de fabricación, ya que supone abordar la fase de desarrollo del producto con un riesgo económico sustancial. El presente proceso de fabricación es solo un ejemplo, en el que la utilización de moldes epoxi reduce el alto coste de inversión del molde, lo que hace que los lotes de producción de tamaño pequeño sean una opción económicamente factible.
- La presente técnica se presenta como una tecnología de fabricación capaz de producir moldes de manera ecológica. Si bien las técnicas sustractivas producen desechos (el mecanizado por arranque de viruta), la presente técnica permite reutilizar y valorizar ciertos residuos procedentes del mecanizado. Este método sostenible de construcción de moldes debería alentar en gran medida a los fabricantes a abordar el problema mundial del exceso de residuos. Por lo tanto, los trabajos futuros en esta área deberían desafiar a los fabricantes a investigar nuevas soluciones para valorizar otra tipología de residuos generados dentro de sus instalaciones, además de la mostrada en el presente trabajo.
- El control en la fabricación, la productividad y la eficiencia energética se podría mejorar con un CPS aplicado a los moldes epoxi sensorizados y a la conexión con las nuevas tecnologías de la información (IoT, CC, BDA...). Gracias a la capacidad de la resina epoxi de embeber y encapsular sensores en su interior, sería posible, también, monitorizar variables como la presión y la temperatura en diversas ubicaciones del molde epoxi. Así pues, también se estiman trabajos futuros en torno a la sensorización y monitorización de moldes para el control de la producción, así como en el uso de tecnologías inteligentes como BDA y CPS para la toma de decisiones. Asimismo, la predicción de la validez de las piezas previo a su fabricación se puede lograr mediante el registro en tiempo real de estas variables de proceso. Esta información se podría analizar para lograr un ajuste del proceso de fabricación, avanzando así hacia un sistema de proceso de producción inteligente, en un contexto de la industria 4.0.

BIBLIOGRAFÍA

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Meng LL, Zhang CY, Shao XY. MILP models for energy-aware flexible job shop scheduling problem. *J Clean Prod* 2019 ; 210: 710–723.
- [2]. Gutowski TG, Allwood JM, Herrmann C, Sahni S. A Global Assessment of Manufacturing: Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling. *Annu Rev Environ Resour* 2013 ; 38: 81-106.
- [3]. Salido M, Escamilla J, Barber F, Giret A Rescheduling in job-shop problems for sustainable manufacturing systems. *J Clean Prod* 2017; 162: 121-132.
- [4]. Liu Y, Dong H, Lohse N, Petrovic S. A multi-objective genetic algorithm for optimisation of energy consumption and shop floor production performance. *Int J Prod Econ* 2016 ; 179: 259-272.
- [5]. Lechtenböhmer S, Nilsson LJ, Ahman M, Schneider C. Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification e Implications for future EU electricity demand. *Energy* 2016 ; 115: 1623-1631.
- [6]. Sheehan E, Braun AT, Kuhlmann T, Sauer A. Improving material efficiency for ultra-efficient factories in closed-loop value networks. *Procedia CIRP* 2016 ; 40: 455-462.
- [7]. Fernandes AC, Souza AF, Pontes AJV, Leite JL. Mechanical and dimensional characterisation of polypropylene injection moulded parts in epoxy resin/aluminium inserts for rapid tooling. *Int J Mater Prod Tec* 2016; 52(1/2):37-52.
- [8]. de Carvalho A, Fagali A, Leite J. Mechanical and dimensional characterisation of polypropylene injection moulded parts in epoxy resin/aluminium inserts for rapid tooling. *Int J Mater Prod Tec* 2016 ; 52:37-52.
- [9]. Bernard A, Fischer A. New trends in rapid product development. *CIRP Ann-Manuf Techn* 2002 ; 51: 635-652.
- [10]. T. Dyllick, K. Hockerts. Beyond the business case for corporate sustainability. *Bus. Strateg. Environ.* 2002; 11: 130–141.
- [11]. S. Schrettle, A. Hinz, M. Scherrer-Rathje, T. Friedli. Turning sustainability into action: explaining firms' sustainability efforts and their impact on firm performance. *Int. J. Prod. Econ.* 2014; 147: 73–84.
- [12]. World Commission on Environment and Development, Our Common Future. Oxford University Press 1987, Oxford, England.
- [13]. Pezzoli, K. Sustainable development: A transdisciplinary overview of the literature. *J. Environ. Plan. Manag.* 1997, 40: 549–574.

-
- [14]. http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/GER_7_Manufacturing.pdf.
- [15]. Sarkis, J. Manufacturing's role in corporate environmental sustainability: Concerns for the new millennium. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 2001; 21: 666–686.
- [16]. Vignes, R.P. Use limited life-cycle analysis for environmental decision-making. *Chem. Eng. Progr.* 2001; 97: 40–54.
- [17]. Bernard A, Tichkiewitch S. *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management*; Springer: Berlin, Germany, 2008.
- [18]. Lu SCY, El Maraghy W, Schuh G, Wilhem R. A scientific foundation of collaborative engineering. *CIRP Ann.* 2007; 56: 605–634.
- [19]. Tien SW, Chung YC, Tsai CH. Environmental design implementation in Taiwan's industries. *Environ. Impact Rev.* 2002; 22: 685–702.
- [20]. Jayal AD, Badurdeen F, Dillon OW, Jawahir IS. Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2010; 2: 144–152.
- [21]. Nasr N, Hilton B, German R. A framework for sustainable production and a strategic approach to a key enabler: remanufacturing. *Adv. Sustain. Manuf.* 2011, 5, 191–196.
- [22]. Shuaib M, Metta H, Lu T, Badurdeen F, Jawahir IS, Goldsby T. Design and performance evaluation of sustainable supply chains: Approach and methodologies. *Adv. Sustain. Manuf.* 2011; 8: 347–352.
- [23]. Jaber MY, Rosen MA. The economic order quantity repair and waste disposal model with entropy cost. *Eur. J. Oper. Res.* 2008; 188: 109–120.
- [24]. Jaber MY, El Saadany, A.M.A.; Rosen, M.A. A simple price-driven reverse logistics system with entropy and exergy costs. *Int. J. Exergy* 2011, 9, 486–502.
- [25]. Parris TM, Kates RW. Characterizing and measuring sustainable development. *Ann. Rev. Environ. Resour.* 2005; 28: 559–586.
- [26]. Stokes, S. *Get Ready for Green 2.0*; AMR Research; Düsseldorf, Germany, 2009.
- [27]. Foster ST. *Managing Quality: an Integrative Approach*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J. 2001.
- [28]. Veleva V, Ellenbecker M. Indicators of sustainable production: framework and methodology. *J Clean Prod* 2001; 9: 519–549.
- [29]. Jayal AD, Balaji AK. On a process modeling framework for sustainable manufacturing: a machining perspective. IMECE2007-ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Seattle, Washington, USA, 2007.

-
- [30]. Jawahir IS, Dillon JOW. Transitioning to sustainable production e Part I: application on machining technologies sustainable manufacturing processes: new challenges for developing predictive models and optimization techniques. In: Proceedings of the First International Conference on Sustainable Manufacturing SM1. Montreal, Canada, 2007.
- [31]. Jawahir IS, Dillon OW, Rouch KE, Joshi KJ, Venkatachalam A, Jaafar IH. Total life-cycle considerations in product design for sustainability: a framework for comprehensive evaluation. In: Proceedings of the 10th International Research/Expert Conference. Barcelona, Spain, 2007.
- [32]. Russell RS, Taylor BW. Operations Management, second ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [33]. Akbari J, Oyamada K, Saito Y. LCA of machine tools with regard to their secondary effects on quality of machines parts. In: Proc. Of 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01). Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc, Tokyo, Japan, 2001.
- [34]. Zaman AU. A Comprehensive Review of the Development of Zero Waste Management: Lessons Learned and Guidelines. *J. Clean. Prod.* 2015; 91:12.25.
- [35]. Ngoc NU, Schnitzer H. Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste Manag.* 2009; 29: 1982-1995.
- [36]. Hanssan MN, Chong TL, Rahman M, Salleh MN, Zakaria Z, Away M. Solid Waste Management - with Special Attention to Malaysia. University of Putra, Malaysia, 2001.
- [37]. Integrated Solid Waste Management in Singapore National Environment Agency. Ministry of the Environment and Water Resources, Singapore. 2001.
- [38]. Waste management in Thailand. Ministerial Regional Forum on Environment and Health, Thailand. 2007.
- [39]. Lwin H. Current Status of Solid Waste Management in Myanmar. City Development Committee, Myanmar. 2003.
- [40]. Kumar V, Bee DJ, Shirodkar PS, Tumkor S, Bettig BP, Sutherland JW. Towards sustainable "product and material flow" cycles: identifying barriers to achieving product multi-use and zero waste. In: Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 5e11, Orlando, Florida USA. 2005.
- [41]. Hamad K, Kaseem M, Der, F. Recycling of waste from polymer materials: an overview of the recent works. *Polym. Degrad. Stab.* 2013; 98 (12): 2801-2812.

-
- [42]. USEPA, 2002. Municipal Solid Waste in the United States: 2000 Facts and Executive Summary. Office of solid waste management and emergency response (5305W), EPA530-S-02e001, June. Available at: www.epa.gov.
- [43]. USEPA, 2008. Municipal Solid Waste in the United States: 2007 Facts and Executive Summary. Office of solid waste management and emergency response (5306P), EPA530-R-08e010, November. Available at: www.epa.gov.
- [44]. Parfit, J. Analysis of Household Waste Composition and Factors Driving Waste Increases, WRAP for Strategy Unit. Government Cabinet Office, London, UK. 2002.
- [45]. Clark JH, Hardy JJE. Towards sustainable chemical manufacturing: poly lactic acid-a sustainable polymer. In: Azapagic A, Perdon S, Clift R. (Eds.), Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists, first ed. Wiley, pp. 250-282. 2004.
- [46]. Singh N, Hui D, Singh R, Ahuja IP, Feo L, Fraternali F. Recycling of plastic solid waste: a state of art review and future applications. *Compos. Part B Eng.* 2017; 115, 409-422.
- [47]. Parfitt J. Analysis of Household Waste Composition and Factors Driving Waste Increases, WRAP for Strategy Unit. Government Cabinet Office, London, UK. 2002.
- [48]. Elzafraney M, Soroushian P, Deru M. Development of energy-efficient concrete buildings using recycled plastic aggregates. *J. Archit. Eng.* 2005; 11: 122-130.
- [49]. Parasivamurthy P. Study of waste plastics as composites material in cement concrete construction. *Adv. Mater. Res.* 2007; 15-17: 220-224.
- [50]. Lei Y, Wu Q, Yao F, Xu Y. Preparation and properties of recycled HDPE/ natural fiber composites. *Comp Part A* 2007; 38: 1664-1674.
- [51]. Boronat T, Segui VJ, Peydro, M.A., Reig, M.J., 2009. Influence of temperature and shear rate on the rheology and processability of reprocessed ABS in injection. *J. Mater. Process. Technol.* 209, 2735-2745.
- [52]. Perez J, Vilas J, Laza J, Arnaiz S, Mijangos F, Bilbao E. Effect of reprocessing and accelerated weathering on ABS properties. *J. Polym. Environ.* 2010; 18: 71-78.
- [53]. Aurrekoetxea J, Sarrionandia MA, Urrutibeascoa I. Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene. *J. Mater Sci* 2011; 36: 2607-2613.
- [54]. Vanitha S, Natrajan V, Praba M. Utilization of waste plastics as a partial replacement of coarse aggregate in concrete blocks. *Indian J. Sci. Technol.* 2015; 8(12).
- [55]. Singh R, Singh N, Fabbrocino F, Fraternali F, Ahuja IPS. Waste management by recycling of polymers with reinforcement of metal powder. *Compos. Part B* 2016; 105: 23-29.

- [56]. Singh R, Singh J, Singh S. Investigation for dimensional accuracy of AMC prepared by FDM assisted investment casting using nylon-6 waste based reinforced filament. *Measurement* 2016; 78: 253-259.
- [57]. Agnihotri VK. E-waste in India. Govt. of India. New Delhi, India. 2011.
- [58]. Vasile C, Brebu MA, Totolin M, Yanik J, Karayildirim T, Darie H. Feedstock recycling from the printed circuit boards of used computers. *Energy Fuel* 2008; 22: 1658-1665.
- [59]. Li J, Xu Z, Zhou Y. Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards. *J. Hazard. Mater.* 2009; 161: 257-262.
- [60]. Brandl H, Bosshard R, Wegmann M. Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. *Hydrometallurgy* 2010; 59: 319-326.
- [61]. Zhou Y, Qiu K. A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards. *J. Hazard. Mater.* 2010; 175: 823-828.
- [62]. Alagusankareswari K, Kumar SS, Vignesh KB, Niyas KAH. An experimental study on e-waste concrete. *Indian J. Sci. Technol.* 2016; 9: 1-5.
- [63]. Barba-Gutierrez Y, Adenso-Diaz B, Hopp M. An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. *Res. Conserv. Recycl* 2008; 52: 481-945.
- [64]. Spalvins E, Dubey B, Townsend T. Impact of electronic waste disposal on lead concentrations in landfill leachate. *Environ. Sci. Technol.* 2008; 42: 7452-7458.
- [65]. Dagan R, Dubey B, Bitton G, Townsend T. Aquatic toxicity of leachates generated from electronic devices. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2007; 53: 168-173.
- [66]. Mielke HW, Reagan PL. Soil is an important pathway of human lead exposure. *Environ. Health Perspect.* 1989; 106: 217-229.
- [67]. Chatterjee R. E-waste recycling spews dioxins into the air. *Environ. Sci. Technol.* 2007; 41: 5577.
- [68]. Ay N, Unal M. The use of waste ceramic tile in cement production. *Cem. Concr. Res.* 2000; 30: 497-499.
- [69]. Rapoport J, Aldea CM, Shah SP, Ankenman B, Karr A. Permeability of Cracked Steel Fiber-reinforced Concrete. Technical Report Number 115. 2001.
- [70]. Putman BJ, Amirkhanian SN. Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. *Resour. Conserv. Recycl.* 2004; 42: 265-274.
- [71]. Mu C, Lin W, Zhang M, Zhu Q. Towards zero discharge of chromium containing leather waste through improved alkali hydrolysis. *Waste Manag.* 2003; 23: 835-843.

- [72]. Bignozzi MC, Sandrolini F. Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. *Cem. Concr. Res.* 2006; 36: 735-739.
- [73]. Ismail ZZ, AL-Hashmi EA. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *Waste Manag.* 2009; 29: 655-659.
- [74]. Abbas AH. Management of steel solid waste generated from lathes as fiber reinforced concrete. *Eur. J. Sci. Res.* 2011; 50: 481-485.
- [75]. Shende AM, Pande AM, Pathan MG. Experimental study on steel fiber reinforced concrete for M-40 grade. *J. Eng. Sci.* 2012; 1: 43-48.
- [76]. Murthi P, Alan S, Chakkaravarthi C, Raguraman N, Seenivasan P. Sustainable replacement of steel slag as coarse aggregate in concrete. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 2015; 4562.
- [77]. Sengul O. Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires. *Constr. Build. Mater.* 2016; 122: 649-658.
- [78]. Taha Y, Benzaazoua M, Mansori M, Yvon J, Kanari N, Hakkou FR. Manufacturing of ceramic products using calamine hydrometallurgical processing wastes. *J. Clean. Prod.* 2016; 127: 500-510.
- [79]. Vijayakumar G, Senthilnathan P, Pandurangan K, Ramakrishna G. Impact and energy absorption characteristics of lathe scrap reinforced concrete. *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.* 2012; 1: 60-66.
- [80]. Shukla AK. Application of CNC waste with recycled aggregate in concrete mix. *Int. J. Eng. Res. Appl.* 2013; 3: 1026-1031.
- [81]. da Costa CE, Zapata WC, Parucker ML. Characterization of casting iron powder from recycled swarf. *J Mater Process Technol* 2003; 143-144: 138-143.
- [82]. Nakamura K. NTN Technical Review No 71, 2004, p.80.
- [83]. Seetharam PG, Bhuvanewari C, Vidhya S, Vishnu PM. Studies on Properties of Concrete Replacing GGBS, Steel Slag and Slate. *IJERT* 2017; 6: 387-393.
- [84]. Takagi H, Miyazaki T, Tamatani J. Recycling Technology for Grinding Swarf: Application to Iron Powder for Disposable Body Warmer. *Appl Mech Mater* 2012; 121-126: 1535-1539.
- [85]. Jensen JP, Skelton K. Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renew. Sust. Energ. Rev* 2018; 97: 165-176.
- [86]. Shuaib NA, Mativenga PT. Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. *J Clean Prod* 2016; 120: 198-206.

-
- [87]. Garcia D, Vegas I, Cacho I. Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete. *Constr Build Mater* 2014; 64: 293–300.
- [88]. Ribeiro MCS, Meixedo JP, Fiúza A, Dinis ML, Castro ACM, Silva FG, Costa C, Ferreira F, Alvim MR. Recycling approach towards sustainability advance of composite materials industry. *Recycling* 2016; 1(1): 178-193.
- [89]. Ribeiro MCS, Meixedo JP, Fiúza A, Dinis ML, Castro ACM, Silva FG, Costa C, Ferreira F, Alvim MR. Mechanical Behaviour Analysis of Polyester Polymer Mortars Modified with Recycled GFRP Waste Materials. *Int J Mech Mechatron Eng* 2011; 5(3): 707-713.
- [90]. Ribeiro MCS, Fiúza A, Castro ACM, Silva FG. Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials. *Compos. Struct.* 2013; 105:300–310.
- [91]. Tatara AR. Compression Molding. *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications* 2017: 291-320.
- [92]. https://www.astar.es/products/smc-sheet-moulding-compound/que-es-smc_14-18-es
- [93]. Pasco C, Kendall K. Characterisation of the thermoset prepreg compression moulding process. The University of Warwick, International Manufacturing Centre, Coventry, United Kingdom.
- [94]. Fette M, Wulfsberg PJ. Optimized and Cost-Efficient Compression Molds Manufactured by Selective Laser Melting for the Production of Thermoset Fiber Reinforced Plastic Aircraft Components. *Procedia CIRP* 2015; 35: 25-30.
- [95]. <http://menzolit.com/products/#toggle-id-4>.
- [96]. <https://www.hexcel.com/Site/Resources/DataSheets/Prepreg.aspx>.
- [97]. Alshahrani H, Mohan R, Hojjati M. Experimental investigation of in-plane shear deformation of out-of-autoclave prepreg. *Int J Compos Mater* 2015; 5 (4): 81–7.
- [98]. Alshahrani H, Mohan R, Hojjati M. Evaluation of in-plane shear deformation of out-of-autoclave carbon/epoxy prepreps using bias extension test. In: *Proceedings of CAMX 2014 Conf. Orlando, FL. USA. 2014*.
- [99]. Alshahrani H, Hojjati M. A new test method for the characterization of the bending behavior of textile prepreps. *Compos Part A*: 2017; 97: 128–40.
- [100]. Keane M, Mulhern M, Mallon P. Investigation of the effects of varying the processing parameters in diaphragm forming of advanced thermoplastic composite laminates. *Compos Manuf* 1995; 6(3–4): 145–52.
- [101]. Alshahrani H, Hojjati M. Optimum processing parameters for hot drape forming of out-of-autoclave prepreg over complex shape using a double diaphragm technique. In:

- Proceedings of 20th International Conference on Composite Materials. Copenhagen, Denmark. 2015.
- [102]. Bian X, Gu Y, Sun J, Li M, Liu W, Zhang Z. Effects of processing parameters on the forming quality of c-shaped thermosetting composite laminates in hot diaphragm forming process. *Appl Compos Mater* 2013; 20(5): 927–45.
- [103]. Besednjak A. Materiales compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones, Ed. UPC. 2005.
- [104]. Michaeli W, Wegener M. Tecnología de los composites/plásticos reforzados, Ed. Hanser. 1989.
- [105]. Shull P J, DH Hurley. Spatial and temporal control of the degree of cure in polymer composite structures. *Polymer Engineering And Science* 2000; 40(5): 1157-1164.
- [106]. Miravete A. Materiales compuestos. Zaragoza. 2000.
- [107]. Hollaway LC. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important inservice properties. *Construction and Building Materials* 2010; 24(12): 2419-2445.
- [108]. McConnell VP. Vinyl esters get radical in composite markets. *Reinforced Plastics*. 2010; 54(6): 34-38.
- [109]. Selley J, Kamody J (1991). Build A Durable Fgd System With Frp. *Chemical Engineering Progress* 1991; 87(9): 86-92.
- [110]. Schutte CL. Environmental durability of glass-fiber composites. *Materials Science & Engineering R-Reports* 1994; 13(7): 265-323.
- [111]. Al-Assafi S. Analysis of aged vinylester and polyester pultruded composites. *Journal of Advanced Materials* 2005; 37(4): 70-75.
- [112]. Fong L, Advani SG. Handbook of Composites (Resin Transfer Molding) pp 433-455. Edición: Peters, S.T. 1998.
- [113]. Maspoch ML. Estudio de la fractura de materiales compuestos por una matriz de plástico. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). 1993.
- [114]. Sahuquillo O. Estudio de la degradación de materiales compuestos base poliéster reforzados con fibra de vidrio en medios neutros y alcalinos. Universitat Politècnica de València. 2012.
- [115]. Mouritz AP, Kootsookos A. Stability of polyester- and vinyl ester based composites in seawater. *Journal of Materials Science* 2004; 39(19): 6073- 6077.
- [116]. Ganem M, Lafontaine E, Mortaigne B. Structure of Vinylester Networks: A Rubber Elasticity Study. *J. Macromol. Sci.-Phys.* 1994; 33(2): 155-172.

- [117]. Karbhari VM, Murphy. Effect of concrete based alkali solutions on short-term durability of E-glass/vinylester composites. *Journal of Composite Materials* 2002; 36(17): 2101-2121.
- [118]. Valea A, Martinez I. Influence of cure schedule and solvent exposure on the dynamic mechanical behavior of a vinyl ester resin containing glass fibers. *Journal Of Applied Polymer Science* 1998; 70 (13): 2595-2602.
- [119]. ASME International Characterization and failure analysis of plastics, ASME International. 2003.
- [120]. Miravete, A. Los nuevos materiales en la construcción. Zaragoza. 1995
- [121]. Siddaramaiah SV, Suresh H. Effect of aggressive environments on composite properties. *Journal Of Applied Polymer Science* 1999; 73(5): 795-799.
- [122]. Bottcher A, Pilato LA. Phenolic resins for FRP systems. *Sampe Journal* 1997; 33(3): 35-40.
- [123]. Gonzalez J, Ranz D, Marquez JA, Miravete, A. Desarrollo de un nuevo sistema de material compuesto: resistente al fuego y altamente estructural. *Materiales de construcción* 2010 ; 60, 298: 109-121.
- [124]. Suherman H, Martiana W, Satri I, Saputra A. Comparative studies of tensile strength on polyester resin matrix composites with planar and random orientation fibers. *Key Engineering Materials* 2007; 345-346: 1503-1506.
- [125]. Swain RE, Reifsnider KL, Jayaraman K, El-Zein M. Interface/Interphase Concepts in Composite Material Systems. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 1990; 3(1): 13-23.
- [126]. Chua PS, Dai SR. Mechanical-Properties Of The Glass-Fiber Polyester Interphase Effect Of Water On Debonding. *Journal Of Materials Science* 1992; 27(4): 919-924.
- [127]. Ismail AE, Awang MK. Tensile strength of natural fiber reinforced polyester composite. *Solid State Science and Technology* 2007; 909: 174-179.
- [128]. García S. Fibras y materiales de refuerzo: los poliésteres reforzados aplicados a la realización de piezas en 3D. *Revista Iberoamericana de Polímeros* 2011; 12(5): 268-282.
- [129]. Qiu Q, Kumosa M. Corrosion of E-glass fibers in acidic environments. *Composites Science and Technology* 1997 ; 57(5): 497-507.
- [130]. Fitzer E. Carbon fibers filaments and composites. Kluwer Academic, Dordrecht pp3-41. 1990.
- [131]. Minguzzi G. Fiber Reinforced Plastics. Florencia (Italia). Editorial Alinea. pp 39. 1998
- [132]. Chung DDL. Carbon fiber composites. Newton (EEUU). Editorial Butterworth-Heinemann. 1994.

-
- [133]. Akay M, Ah Mun SK. Influence of moisture on the thermal and mechanical properties of autoclaved and oven-cured Kevlar-49/epoxy laminates. *Composites Science and Technology* 1997; 57(5): 565-571.
- [134]. Jang BZ. *Advanced Polymer Composites: Principles and Applications*, ASM International. 1994.
- [135]. Rudd CD, Long AC, Kendall KN. *Liquid Moulding Technologies*. Editorial Woodhead Publishing, Ltd. 2012.
- [136]. Mazumdar SK. *Composites manufacturing. Materials, Product and Process Engineering*. Editorial CRC Press. 2002.
- [137]. Hollaway LC. *Handbook of Polymer Composites for Engineers*. Editorial Elsevier. 1994
- [138]. *Tool and Manufacturing Engineers Handbooks. Volume VIII: Plastic Part Manufacturing*. Editor: Philip Mitchell. 1996.
- [139]. Brouwer WD, van Herpt ECFC, Labordus M. Vacuum injection moulding for large structural applications. *Compos Part A: Appl Sci Manuf*. 2003; 34: 551-558.
- [140]. Hurtado JH, Viedma A, Kaiser SA. Numerical analysis of the vacuum infusion process for sandwich composites with perforated core and different fiber orientations. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2015; 18 (4): 415-444.
- [141]. Fong L, Advani SG. *Handbook of Composites (Resin Transfer Molding)* pp 433-455. Edición: Peters, S.T. 1998.
- [142]. Krolewski S, Busch J. *Proceedings of the 35th International SAMPE Symposium*, p.1761, 1990.
- [143]. <https://www.tapasyregistros.com/content/6-clases-de-carga>
- [144]. <https://accysa.com/producto/acometidas-suelo/tapas-de-registro/tapas-de-registro-poliester/>
- [145]. <https://www.bauhaus.es/laminas-de-drenaje-y-proteccion/aco-tapa-de-registro-toptek-rellenable-c250/p/24043494>
- [146]. <https://www.pamline.es/productos/rejillas-concavas-cuadradas-clase-c250>
- [147]. https://www.glsprefabricados.com/upload/descargues/Descargues_5_1.pdf
- [148]. <https://www.jimten.com/es/30527/rejillas-y-canaletas/>
- [149]. Jina Y, Yinb X, Liguang X. Application of Epoxy Resin Concrete in Covers. *Applied Mechanics and Materials* 2012 ; 204-208 : 3819-3822.
- [150]. Hagggar S, Lama H. Reinforcement of thermoplastic rejects in the production of manhole covers. *J Clean Prod* 2009 ; 17 : 440-446.

- [151]. Composite manhole covers can be lifted by hand. *Reinforced Plastics* 2015;59: 63
<https://www.reinforcedplastics.com/content/other/composite-manhole-covers-can-be-lifted-by-hand>
- [152]. http://www.polieco.com/es/chiusino_kio/
- [153]. <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=WO&NR=2012056381A1&KC=A1&FT=D>
- [154]. Ma S, Gibson I, Balaji G, Hua QJ. Development of epoxy matrix composites for rapid tooling applications. *J Mater Process Technol* 2007; 192–193: 75-82.
- [155]. Chua CK., Hong KH, Ho SL. Rapid Tooling Technology. Part 1. A Comparative Study. *Int J Adv Manuf Tech* 1999; 15:604-608.
- [156]. Noble J, Walczark K, Dornfeld D. Rapid tooling injection moulded prototypes: a case study in artificial photosynthesis technology, *Procedia CIRP* 2014; 14: 251–256.
- [157]. Chua CK, Leong KF, Lim CS. *Rapid prototyping – principles and applications*. New Jersey: World Scientific Publishing Co, 2010, p.123.
- [158]. Chua CK, Leong KF, Liu ZH. Rapid Tooling in Manufacturing. In: Nee AYC (Ed.) *Handbook of manufacturing engineering and technology*. London: Springer, 2015, pp.2525-2550.
- [159]. Khushairi MTM, Sharif S, Ani JSM. Evaluation of Mechanical Properties of Filled Epoxy Composite for Improving Mould Performance – A Review. *Appl Mech Mater* 2015; 735: 13-18.
- [160]. Vasconcelos PV, Lino FJ, Baptista AM, Neto RJL. Tribological behaviour of epoxy based composites for rapid tooling. *Wear* 2006; 260 (1/2): 30-39.
- [161]. Vasconcelos PV, Lino FJ, Magalhaes A, Neto RJL. Impact fracture study of epoxy-based composites with aluminium particles and milled fibres. *J Mater Process Technol* 2005; 170 (1/2): 277-283.
- [162]. Koerner T, Brown L, Xie R, Oleschuk RD. Epoxy resins as stamps for hot embossing of microstructures and microfluidic channels. *Sensor Actuat B* 2005; 107(2):632-639.
- [163]. Wohlers T, *Wohlers Report 2003 Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing, State of the Industry*. Fort Collins: Wohlers Associates, 2003, p.214.
- [164]. Guilong W, Guoqun Z, Huiping L, Yanjin G. Analysis of thermal cycling efficiency and optimal design of heating/cooling systems for rapid heat cycle injection moulding process. *Mater Des* 2010 31: (7) 3426–3441.
- [165]. Martinho PG, Bartolo PJ, Pouzada AS. Hybrid moulds: effect of the moulding blocks on the morphology and dimensional properties. *Rapid Prototyp J* 2009 15: 71–82.

- [166]. Sabino-Netto AC, Salmoria GV, Ahrens CH, Pouzada AS. Mechanical properties of epoxy composites filled with short steel fibres for hybrid injection moulds. *Adv Mater Forum* 2008; 587: 222–226.
- [167]. Pouzada AS. Hybrid moulds: a case of integration of alternative materials and rapid prototyping for tooling. *Virtual Phys Prototyp* 2009; 4:195-202.
- [168]. Chung SI, Im YG, Jeong HD, Nakagawa T. The effects of metal filler on the characteristics of casting resin for semi-metallic soft tools. *J Mater Process Technol* 2003; 134: 26–34.
- [169]. Pontes AJ, Queiros MP, Martinho PG, Bartolo PJ, Pouzada AS. Experimental assessment of hybrid mould performance. *Int J Adv Manuf Tech* 2010; 50:441–448 .
- [170]. Gonçalves MW, Salmoria GV, Ahrens CH, Pouzada AS. Study of tribological properties of moulds obtained by stereolithography. *Virtual Phys Prototyp* 2007 2:29–36.
- [171]. Cheah CM, Chua CK, Ong HS. Rapid Moulding Using Epoxy Tooling Resin. *Int J Adv Manuf Tech* 2002; 20:368–37.4
- [172]. Ferreira JC, Mateus A. Studies of rapid soft tooling with conformal cooling channels for plastic injection moulding. *J Mater Process Technol* 2003; 142: 508–516.
- [173]. Huang PH, Lin CJ Computer-aided modelling and experimental verification of optimal gating system design for investment casting of precision rotor. *Int J Adv Manuf Tech* 2015; 79(5): 997-1006.
- [174]. Kuo CC, Chen WH, Liu XZ, Liao YL, Chen WJ, Huang BY, Tsai RL. Development of a low-cost wax injection mould with high cooling efficiency. *Int J Adv Manuf Tech* 2017 93: 2081–2088.
- [175]. Kuo CC, Chen WH, Xu WC. A cost-effective approach for rapid manufacturing wax injection moulds with complex geometrical shapes of cooling channels. *Int J Adv Manuf Tech* 2017; 91:1689-1695.
- [176]. Kuo CC, Wu JQ. Development of a low-cost epoxy resin mold with high cooling efficiency. *Int J Adv Manuf Tech* 2021; 113(1–4):1-22.
- [177]. Kuo CC, Qiu SX, Lee GY, Zhou J, He HQ. Characterizations of polymer injection molding tools with conformal cooling channels fabricated by direct and indirect rapid tooling technologies. *Int J Adv Manuf Tech* 2021; 1-18.
- [178]. Cheah CM, Chua CK, Lee CW, Feng C, Totong K. Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting. *Int J Adv Manuf Tech* 2005; 25: 308–320.

- [179]. Rahmati S, Rezaei MR, Akabari J. Design and Manufacture of a Wax Injection Tool for Investment Casting Using Rapid Tooling. *Tsinghua Sci Technol* 2009; 14:108-115.
- [180]. Vaezi M, Safaeian D, Chua CK. Gas turbine blade manufacturing by use of epoxy resin tooling and silicone rubber moulding techniques. *Rapid Prototyp J* 2011; 17(2):107-115.
- [181]. Sarraji WKH, Hussain J, Ren WXA. Experimental investigation on forming time in negative incremental sheet metal forming process. *Mater Manuf Process* 2012; 27(5):499–506.
- [182]. Hussain G, Al-Ghamdi KA, Khalatbari H, Iqbal A, Hashemipour M. Forming parameters and forming defects in incremental forming process: part B. Processes. *Mater Manuf Process* 2014 29(4): 454-460.
- [183]. Singh R. Effect of workpiece volume on statistically controlled rapid casting solution of low melting alloys using three-dimensional printing. *Mater Manuf Process* 2012; 27(4):377-382.
- [184]. Wang J, Li J, Su X, Tu H, Wu C. Influence of melting temperature and cooling rate on microstructure of a bismuth–manganese–iron alloy. *Mater Manuf Process* 2014; 29(2):175–183.
- [185]. Qu NS, Qian WH, Hu XY, Zhu ZW. Preparation of a microprism Ni-CeO₂ nanocomposite mould by electroforming. *Mater Manuf Process* 2014; 29(1): 37–41.
- [186]. Hasan MF, Wang J, Berndt CC. Effect of power and standoff distance on plasma sprayed hydroxyapatite coatings. *Mater Manuf Process* 2014; 28(12):1279–1285.
- [187]. Kuo CC, Li MR. Development of sheet metal forming dies with excellent mechanical properties using additive manufacturing and rapid tooling technologies. *Int J Adv Manuf Tech* 2017; 90: 21–25.
- [188]. Kuo CC, Li MR. A cost-effective method for rapid manufacturing sheet metal forming dies. *Int J Adv Manuf Tech* 2016; 85:2651–2656.
- [189]. Kuo CC, Chen BC. Development of hot embossing stamps with conformal cooling channels for microreplication. *Int J Adv Manuf Tech* 2017; 88: 2603–2608.
- [190]. Kuo CC, Lyu SY. A cost-effective approach using recycled materials to fabricate micro-hot embossing dies for microfabrication. *Int J Adv Manuf Tech* 2018; 94:4365-4371.
- [191]. Kuo CC, Chiang TS. Effects of Different Backing Materials of Hybrid Rapid Tooling on the Demoulding time in the Hot Embossing Process. *Mater Sci* 2018; 24 (3): 332–337.
- [192]. Kuo CC, Chiang TS. Development of a precision hot embossing tool with microstructures for microfabrication. *Int J Adv Manuf Tech* 2017; 91:1321–1326.

- [193]. Kuo CC, Wang YJ. Optimization of plasma surface modification parameter for fabricating a hot embossing mould with high surface finish. *Int J Adv Manuf Tech* 2017; 91:3363–3369.
- [194]. Kuo CC, Wang YJ. Development of a Micro-Hot-Embossing Mould with High Replication Fidelity Using Surface Modification. *Mater Manuf Process* 2014; 29 (9): 1101-1110.
- [195]. Hopmann C, Behmenburg C, Recht U, Zeuner K. Injection Molding of Superhydrophobic Liquid Silicone Rubber Surfaces. *Silicon* 2014; 6: 35-43.
- [196]. Kuo CC, Lin JX. A cost-effective method for rapid manufacturing polymer rapid tools used for liquid silicone rubber injection molding. *Int J Adv Manuf Technol* 2019; 104: 1159-1170.
- [197]. Garcia MA, Garcia-Pando C, Marto C. *Conformal cooling in moulds with special geometry*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2012, p.94.
- [198]. Dang XP, Park HS. Design of U-shape milled groove conformal cooling channels for plastic injection mould. *Int J Prec Eng Manuf* 2011; 12(1):73–84.
- [199]. Armillotta A, Baraggi R, Fasoli S. SLM tooling for die casting with conformal cooling channels. *Int J Adv Manuf Tech* 2014; 71(1):573–583.
- [200]. Hall M and Krystofik M. Conformal cooling white paper. <https://www.rit.edu/gis/coe/sites/rit.edu.gis.coe/files/Conformal%20Cooling%20White%20Paper.pdf> (2015, accessed 15 October 2018).
- [201]. Shinde MS, Ashtankar KM. Additive manufacturing–assisted conformal cooling channels in mould manufacturing processes. *Adv Mech Eng* 2017; 9(5): 1–14.
- [202]. Li CG, Li CL. Plastic injection mould cooling system design by the configuration space method. *Comput Aided Des* 2008; 40 (3): 334-349.
- [203]. Au KM, Yu KM, Chiu WK. Visibility-based conformal cooling channel generation for rapid tooling. *Comput Aided Des* 2011; 43(4):356–373.
- [204]. Pupo Y, Monroy KP, Ciurana J. Influence of process parameters on surface quality of CoCrMo produced by selective laser melting. *Int J Adv Manuf Tech* 2015; 80(5): 985–995.
- [205]. Taha MA, Yousef AF, Gany KA, Sabour HA. On selective laser melting of ultra high carbon steel: Effect of scan speed and post heat treatment. *Mater Wiss Werkst Tech* 2012; 43(11): 913–923.
- [206]. Singh S, Sharma VS, Sachdeva A, Sinha SK. Optimization and Analysis of mechanical properties for selective laser sintered polyamide parts. *Mater Manuf Process* 2013; 28(2):163–172.

- [207]. Temmler A, Willenborg E, Wissenbach K. Design surfaces by laser remelting. *Mater Wiss Werkst Tech* 2015; 46(7): 692–703.
- [208]. Dimla DE, Camilotto M and Miani F. Design and optimization of conformal cooling channels in injection moulding tools. *J Mater Process Tech* 2005; 164–165: 1294–1300.
- [209]. Saifullah ABM and Masood SH. Cycle time reduction in injection moulding with conformal cooling channels. In: *Proceedings of the international conference on mechanical engineering (ICME2007)*, Dhaka, Bangladesh, 29–31 December 2007.
- [210]. Sun YF, Lee KS, Nee AYC. Design and FEM analysis of the milled groove insert method for cooling of plastic injection moulds. *Int J Adv Manuf Tech* 2004; 24:715–726.
- [211]. Au KM, Yu KM. A scaffolding architecture for conformal cooling design in rapid plastic injection moulding. *Int J Adv Manuf Tech* 2007; 34: 496–515.
- [212]. Saifullah ABM, Masood SH. Finite element thermal analysis of conformal cooling channels in injection moulding. In: *Proceedings of the 5th Australasian congress on applied mechanics*, Brisbane, Australia, 10–12 December 2007.
- [213]. Saifullah ABM, Masood SH, Sbarski I. Thermal-structural analysis of bi-metallic conformal cooling for injection moulds. *Int J Adv Manuf Tech* 2012; 62:123–133.
- [214]. Park H, Pham N. Design of conformal cooling channels for an automotive part. *Int J Automot Techn* 2009; 10: 87–93.
- [215]. Dang XP, Park HS. Design of U-shape milled groove conformal cooling channels for plastic injection mould. *Int J Precis Eng Manuf* 2011; 12: 73–84.
- [216]. Altaf K, Raghavan VR, Rani AMA. Comparative thermal analysis of circular and profiled cooling channels for injection mould tools. *J Appl Sci* 2011; 11: 2068-2071.
- [217]. Muhammad Khan S, Kamran Afaq S, Khan UN. Cycle time reduction in injection moulding process by selection of robust cooling channel design. *Mech Eng* 2014; 1:1-8.
- [218]. Kuo CC, Chen WH. Improving Cooling Performance of Injection Molding Tool with Conformal Cooling Channel by Adding Hybrid Fillers. *Polymers* 2021; 13: 1224.
- [219]. Kuo CC, Chen WH, Zhang JW, Tsai DA, Cao YL, Juang BY. A new method of manufacturing a rapid tooling with different cross-sectional cooling channels. *Int J Adv Manuf Tech* 2017; 92: 3481–3487.
- [220]. Liu W, Wang X, Li Z, Gu J, Ruan S, Shen C, Wang X. Integration optimization of moulding and service for injection moulded product. *Int J Adv Manuf Tech* 2016; 84(9):2019–2028.

- [221]. Altaf K, Rani AMA, Raghavan VR. Prototype production and experimental analysis for circular and profiled conformal cooling channels in aluminium filled epoxy injection mould tools. *Rapid Prototyp J* 2013; 19: 220–229.
- [222]. Song XH, LiW, Song PH, Su QY, Wei QS, Shi YS, Liu K, Liu WG. Selective laser sintering of aliphatic-polycarbonate / hydroxyapatite composite scaffolds for medical applications. *Int J Adv Manuf Tech* 2015; 81(1):15–25.
- [223]. Song C, Yang Y, Liu Y, Luo Z, Yu JK. Study on manufacturing of W-Cu alloy thin wall parts by selective laser melting. *Int J Adv Manuf Tech* 2015; 78(5):885–893.
- [224]. Xue Z, Yang Q, Gu L, Hao X, Ren Y, Geng Y. Diffusion bonding of TiAl based alloy to Ti–6Al–4V alloy using amorphous interlayer. *Mater Wiss Werkst Tech* 2015; 46(1):40–46.
- [225]. Jafari H, Idris MH, Ourdjini A. A Review of Ceramic Shell Investment Casting of Magnesium Alloys and Mould-Metal Reaction Suppression. *Mater Manuf Process* 2013; 28(8): 843–856.
- [226]. Altaf K, Rani AMA. Thermal conductivity augmentation of epoxy injection moulds for cooling time reduction. In: *Proceedings of the 1st International conference on progress in additive manufacturing*, Pro-AM Conference Papers 2014, pp.270-277.
- [227]. Gope PC, Singh VK. Effect of filler addition and strain rate on the compressive strength of silica styrene-butadiene rubber-filled epoxy composites. *Polym Eng Sci* 2011; 51(6):1130–1136.
- [228]. Bhagyashekar MS, Rao RMVGK. Characterization of Mechanical Behavior of Metallic and Nonmetallic Particulate Filled Epoxy Matrix Composites. *J Reinf Plast Comp* 2010; 29:30-42.
- [229]. Wetzel B, Hauptert F, Friedrich K, Zhang MQ, Rong MZ. Impact and wear resistance of polymer nanocomposites at low filler content. *Polym Eng Sci* 2002; 42(9):1919–1927.
- [230]. Burmistrov IN, Shatrova NV, Mostovoy AS, Mazov IN, Kuznetsov DV, Panova LG, Gorokhovskiy AV, Yudin AG. Mechanical properties of surface-modified potassium polytitanate small additives/ epoxy composite materials. *Polym Eng Sci* 2014; 54(12): 2866–2871.
- [231]. Mostovoi AS, Ledenev AN, Panova LG. Modification of Epoxy Matrix by Whiskers of Potassium Polytitanate. *Inorg Mater* 2017; 8 (5): 755–758.
- [232]. Khushairi MTM, Sharif S, Jamaludin KR, Mohruni AS. Effects of Metal Fillers on Properties of Epoxy for Rapid Tooling Inserts. *IJASEIT* 2017; 7: 1155-1161.
- [233]. Segal JI, Campbell RI. A review of research into the effects of rapid tooling on part properties. *Rapid Prototyp J* 2001; 7(2): 90-98.

- [234]. Chung S, Im Y, Kim H, Park S, Jeong H. Evaluation of MicroScale Structures Fabricated Using Epoxy-aluminium Particle Composite and its Application, *J Mater Process Technol* 2005; 160: 168–171.
- [235]. Bhagyashekar MS, Rao K, Rao RMVGK. Studies on Rheological and Physical Properties of Metallic and Non-metallic Particulate Filled Epoxy Composites. *J Reinf Plast Comp* 2009; 28(23): 2869-2878.
- [236]. Vasconcelos P. *Fabrico rapido indirecto de ferramentas compostas a partir de modelos de prototipagem rápida*. PhD Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2004.
- [237]. Vasconcelos P, Jorge Lino F, Neto RJ. Utilizacao de fibras moidas no fabrico de ferramentas de matriz polimerica. In: *Proceedings of 2as Jornadas Politecnicas de Engenharia Mecanica*, Setubal, Portugal, 2001.
- [238]. Fu J, Shi L, Zhang D, Zhong Q, Chen Y. Effect of nanoparticles on the performance of thermally conductive epoxy adhesives. *Polym Eng Sci* 2010; 50(9):1809–1819.
- [239]. Tomori T, Melkote S, Konis M. Injection mould performance of machined ceramic filled epoxy tooling boards. *J Mater Process Technol* 2004; 145: 126-133.
- [240]. Ngoc NU, Schnitzer H. Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste Manag* 2009; 29: 1982-1995.
- [241]. Singh S, Ramakrishna S, Gupta MK. Towards zero waste manufacturing: A multidisciplinary review. *J Clean Prod* 2017; 168: 1230-1243.
- [242]. Jawahir IS, Dillon JOW. Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies sustainable manufacturing processes: new challenges for developing predictive models and optimization techniques. In: *Proceedings of the First International Conference on Sustainable Manufacturing SM1*. Montreal, Canada, 2007, pp.1-15.
- [243]. Jawahir IS, Dillon OW, Rouch KE, Joshi, KJ, Venkatachalam A, Jaafar IH. Total life -cycle considerations in product design for sustainability: a framework for comprehensive evaluation. In: *Proceedings of the 10th International Research/Expert Conference*, Barcelona, Spain, 2006, pp.1-10.
- [244]. Nóvoa PRO, Ribeiro MCS, Ferreira AJM, Marques ATM. Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granules. *Compos Sci Technol* 2004; 64 (13-14): 2197–2205.

- [245]. Ribeiro MCS, Fiúza A, Castro ACM, Silva FG, Dinis ML, Meixedo JP, Alvim MR. Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials. *Compos Struct* 2013; 105:300-310.
- [246]. Bignozzi MC, Sacconi A, Sandrolini F. New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 1: microstructure and mechanical properties. *Compos Part A* 2000; 31(2): 97–106.
- [247]. Bignozzi MC, Sacconi A, Sandrolini F. New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 2: dynamic mechanical and dielectric behavior. *Compos Part A* 2002; 33(2): 205–211.
- [248]. Rebeiz KS, Serhal SP, Craft AP. Properties of polymer concrete using fly ash. *J Mater Civ Eng* 2004; 16(1): 9–15.
- [249]. Ribeiro MCS, Nóvoa PRO, Marques ATM, Ferreira AJM. Mechanical characterization of lightweight wood-modified polymer concrete. *Cie Tecnol Mater* 2004; 16: 81–87.
- [250]. Reis JML, Jurumenha MAG. Experimental investigation on the effects of recycled aggregate on fracture behaviour of polymer concrete. *Mater Res* 2011; 14(3): 326–330.
- [251]. Ribeiro MCS, Meixedo JP, Fiúza A, Dinis ML, Castro ACM, Silva FG, Costa C, Ferreira F, Alvim MR. Mechanical Behaviour Analysis of Polyester Polymer Mortars Modified with Recycled GFRP Waste Materials. *Int J Mech Mechatron Eng* 2011; 5(3): 707-713
- [252]. Kuo CC. Development of green rapid tooling technologies. *Indian J Eng Mater Sci* 2013; 20: 245-251.
- [253]. Kuo CC, Lin ZY, Tsai WL. A new environment friendly process for making green epoxy-based composites mould. *Adv Mater Res* 2012; 341-342:194-198.
- [254]. McKenna R, Reith S, Cail S, Kessler A, Fichtner W. Energy savings through direct secondary reuse: an exemplary analysis of the German automotive sector. *J Clean Prod* 2013; 52: 103-112.
- [255]. Kuo CC, You ZY, Chang SJ, Liao JD, Yu ST, Zeng RT. Development of green conformal cooling channels for rapid tooling. *Int J Adv Manuf Technol* 2020; 111: 109-125.
- [256]. Cao J, Brinksmeier E, Fu M, Gao RX, Liang B, Merklein M, Schmidt M, Yanagimoto J. Manufacturing of advanced smart tooling for metal forming. *CIRP Ann - Manuf Techn* 2019; 68: 605–628.
- [257]. Kim RW, Kim CM, Hwang KH, Kim SR. Embedded Based Real-Time Monitoring in the High-Pressure Resin Transfer Moulding Process for CFRP. *Appl Sci* 2019; 9: 1795-1800.

-
- [258]. Ageyeva T, Horváth S, Kovacs JG. In-Mould Sensors for Injection Moulding: On the Way to Industry 4.0. *Sensors* 2019; 19: 3551.
- [259]. Griffiths ER, Leigh SJ. Multi-material fused deposition modelling for integration of interdigital dielectric sensors into carbon fibre composite tooling for in process cure monitoring. *Sensor Actuat A* 2019; 296: 272–277.
- [260]. Kuo CC, Chen WJ. Development and application of intelligent monitoring system for rapid tooling applied in low-pressure injection molding. *Int J Adv Manuf Technol* 2020; 111: 1-15.
- [261]. Zambal S, Eitzinger C, Clarke M, Klintworth J, Méchin PY. A digital twin for composite parts manufacturing: Effects of defects analysis based on manufacturing data. In: *IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Porto, Portugal, 2018, pp.803-808.
- [262]. Alam KM, El-Saddik A. A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE Access* 2017; 5: 2050-2062.
- [263]. Noor A. Putting Big Data to Work. ASME Mechanical Engineering, 2013.
- [264]. Prabhu N. Design and Construction of an RFID-enabled Infrastructure. CRC Press, 2013.
- [265]. Liu C, Jiang PY. A cyber-physical system architecture in shop floor for intelligent manufacturing. *Procedia CIRP* 2016; 56: 372-377.
- [266]. Wang S, Liang YC, Li WD, Cai XT. Big Data enabled Intelligent Immune System for energy efficient manufacturing management. *J Clean Prod* 2018; 195: 507-520.
- [267]. Liang YC, Lu X, Li WD, Wang S. Cyber Physical System and Big Data enabled energy efficient Machining optimization. *J Clean Prod* 2018; 187: 46-62.
- [268]. Hauf D, Süß S, Strahilov A, Franke J. Multifunctional use of functional mock-up units for application in production engineering. In: *IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Emden, Germany, 2017, pp.1090-1095.
- [269]. Kannan K, Arunachalam N. A digital twin for grinding wheel: an information sharing platform for sustainable grinding process, *J Manuf Sci Eng* 2019; 141:21-35.
- [270]. Yan J, Li L. Multi-objective optimization of milling parameters e the tradeoffs between energy, production rate and cutting quality. *J Clean Prod* 2013; 52: 462-471.
- [271]. Winter M, Li W, Kara S, Herrmann C. Determining optimal process parameters to increase the eco-efficiency of grinding processes. *J Clean Prod* 2014; 66: 644-654.
- [272]. Yan J, Li L, Zhao F, Zhang F, Zhao Q. A multi-level optimization approach for energy-efficient flexible flow shop scheduling. *J Clean Prod* 2016; 13: 1543-1552.

- [273]. Tang D, Dai M, Salido M, Giret A. Energy-efficient dynamic scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization. *Comput Ind* 2016; 81: 82-95.
- [274]. Liu Y, Dong H, Lohse N, Petrovic S. A multi-objective genetic algorithm for optimisation of energy consumption and shop floor production performance. *Int J Prod Econ* 2016; 179: 259-272.
- [275]. Xu W, Shao L, Yao B, Zhou Z, Pham D. Perception data-driven optimization of manufacturing equipment service scheduling in sustainable manufacturing. *J Manuf Syst* 2016; 41: 86-101.
- [276]. Salido M, Escamilla J, Barber F, Giret A. Rescheduling in job-shop problems for sustainable manufacturing systems. *J Clean Prod* 2017; 162: 121-132.
- [277]. Gahm C, Denz F, Dirr M, Tuma A. Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework. *Eur J Oper Res* 2016; 248 (3): 744-757.
- [278]. San-Jose JT, Sancibrian R, Blanco JM, Rojo E, Marcos I, Larrauri MI. Teaching students how to solve complex engineering problems by using decision making approaches: value analysis. In: 9th International technology, education and development conference, Madrid. Spain. 2015.
- [279]. Nayak S, Satapathy A, Mantry S. Processing and wear response study of glass-polyester composites with waste marble dust as particulate filler. *Polym Compos* 2020; 41: 2263-2273.
- [280]. Thermal Analysis Application No. UC 226, Application published in Mettler Toledo Thermal Analysis UserCom 22, 2010.
- [281]. Ibáñez JA, Abellán FJ, Valerdi RP, Gamuz JAG. Conductividad térmica de una barra de cobre. Estudio experimental del transitorio. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 2008; 2: 259-267.
- [282]. Acosta-Perez E, Salazar M, Mendoza JM, Salazar C. Ceramic densification effect on corrosion resistance and thermal conductivity. *Journal of Research and Development* 2020; 6: 11-17.
- [283]. <https://camacolvalle.org.co/wp-content/uploads/2019/04/Capitulo-5.pdf>.
- [284]. Coeficiente de transferencia de calor por convección. http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm
- [285]. Barone MR, Caulk DA. Compression molding: nonuniform cavity surface temperature and cycle time. In: Proceedings of the First International Conference on reactive processing of polymers. Pittsburgh. PA. 1980.

- [286]. UNE-EN 124:2015. Dispositivos de cubrimiento y de cierre para zonas de circulación utilizadas por peatones y vehículos. Principios de construcción, ensayos de tipo, marcado, control de calidad.
- [287]. Miravete A, Antequera P, Jiménez L. Cálculo y diseño de estructuras de materiales compuestos de fibra de vidrio. Universidad de Zaragoza. 1993.
- [288]. <https://material-properties.org/es/caucho-tabla-de-materiales-aplicaciones-precio/>
- [289]. ASME RTP-1: Reinforced Thermoset Plastic Corrosion-Resistant Equipment. ASME. 2021.
- [290]. Lokensgard E. Industrial plastics: theory and applications. Delmar Cengage Learning, New York. 2010.
- [291]. Davis BA, Gramann PJ, Osswald TA, Rios AC. Compression molding. Hanser Gardner Publications, Cincinnati. 2003.
- [292]. Leite JL, Salmoria GV, Ahrens CH, Pouzada AS. Characterization of Epoxy/Steel Fibres Composites for Hybrid Injection Moulds. *Mater Sci Forum* 2013; 730: 277.
- [293]. Callister WD. Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley, New York. 1999.
- [294]. Chiu SH, Wu CL, Gan SY, Chen KT, Wang YM. Thermal and mechanical properties of copper / photopolymer composite. *Rapid Prototyp J* 2015; 22(9): 684-690.
- [295]. Barone MR, Caulk DA. Compression molding: nonuniform cavity surface temperature and cycle time. In: Proceedings of the First International Conference on reactive processing of polymers. Pittsburgh. PA. 1980.
- [296]. Yusof M, Afifi AM, Razali NT, Sawawi M, AKarim AR. Calcium Carbonate from Clam Shell as a Thermal Conductor in Particulate Filled Polymer Matrix Composites. *Int J Eng Technol* 2018; 7:101-105.
- [297]. Vakili MH, Dehaghani HE, Haghshenas M. Crystallization and Thermal Conductivity of CaCO₃ Nanoparticle Filled Polypropylene. *J Macromol Sci Phys* 2011; 8:1637-1645.
- [298]. Osugi R, Takagi H, Liu K, Gennai Y. Thermal conductivity behavior of natural fiber-reinforced composites. In: Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics, Yokohama, Japan. 2009.
- [299]. Modarresifar F, Bingham PA, Jubb GA. Thermal conductivity of refractory glass fibres: A study of materials, standards and test methods. *J Therm Anal Calorim* 2016; 125: 35–44.
- [300]. Pizzi A, Ibeh CC. Handbook of thermoset plastics. Elsevier. Amsterdam. 2014.
- [301]. Cybulski E. Plastic conversion processes. CRC Press. Boca Raton. 2009.

-
- [302]. Duranik T, Ruzbarsky J, Stopper M. Influence on the productivity of modern thermoset preheating in the compression molding technology. *Adv Mat Res* 2013; 717: 47-78.
- [303]. Kluge NEJ, Lundström TS, Westerberg LG, Olofsson K. Compression moulding of sheet moulding compound: Modelling with computational fluid dynamics and validation. *J Reinf Plast Compos* 2015; 34: 479-492.
- [304]. Su J, Du B, Li Jin, Li Z. Electrical Tree Degradation in High-Voltage Cable Insulation: Progress and Challenges. *High Volt* 2020; 5(4): 353-364.
- [305]. Ma Y, Centea T, Nutt SR. Defect reduction strategies for the manufacture of contoured laminates using vacuum BAG-only prepregs. *Polym Compos* 2017; 38 (9): 2016-2025
- [306]. Williams C, Summerscales J, Grove S. Resin Infusion under Flexible Tooling (RIFT): a review. *Compos Part A-Appl S* 1996; 27(7): 517-524.
- [307]. Hollenberg GW, Terwilliger GR, Gordon RS. Calculation of Stress and Strain In Four-Point Bending Creep Tests. *Journal of the American Ceramic Society* 2006; 54(4):196 – 199.
- [308]. Shokrieh MM. Ghanei AR. Destructive techniques in the measurement of residual stresses in composite materials: an overview. *Residual Stresses in Composite Materials* 2014; 15-57.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

7 GLOSARIO DE TÉRMINOS

A continuación, se muestra el glosario de términos que se muestran en la presente Tesis.

AL/EP: Compuesto aluminio-epoxi

BDA: *Big Data Analytics*

BMC: *Bulk Moulding Compound*

CaCO₃/EP: Compuesto CaCO₃-epoxi

CC: *Cloud Computing*

CCC: *Conformal cooling channels*

CNC: *Computerized Numerical Control*

CPS: *Cyber-Physical Systems*

CS: Coeficiente de seguridad

DSC: *Differential scanning calorimetry*

DT: *Digital Twins*

E: Módulo elástico de un material isótropo

Ex: Módulo elástico en la dirección X de un material ortótropo

Ey: Módulo elástico en la dirección Y (ortogonal a X y Z) de un material ortótropo

Ez: Módulo elástico en la dirección Z (ortogonal a X y Y) de un material ortótropo

EDX: *Energy dispersive X-ray spectroscopy*

EP: Matriz epoxi

FDM: *Fused deposition modeling*

GFRP: *Glass fibre reinforced plastic*

GSS: *Grinding Steel Swarf*

GSS/EP: Compuesto GSS-epoxi

Gxy: Módulo de cortadura en un plano normal a la dirección Y; y en la dirección X

Gxz: Módulo de cortadura en un plano normal a la dirección Z; y en la dirección X

Gyz: Módulo de cortadura en un plano normal a la dirección Z; y en la dirección Y

HPC: *High Performance Compound*

IoT: Internet de las cosas

IST: *Indirect soft tooling*

LSRIM: *liquid silicone rubber injection molding*

MEKP: peróxido de metil-etil-cetona

PCCC: *profiled conformal cooling channels*

PLA: ácido poliláctico

RP: *Rapid Prototyping*

RT: *Rapid Tooling*

R_T : Resistencia a rotura del laminado cuasi-isótropo

RTM: *Resin transfer moulding*

S: Resistencia interlaminar a rotura del compuesto ortótropo

SEM: *Scanning electron microscope*

SMC: *Sheet molding compound*

SLA: *Stereolithography*

SLM: *Selective laser melting*

SLS: *Selective laser sintering*

SMC/EP: Compuesto SMC-epoxi

S_1 : Tensión normal en la dirección 1 (Figura 3.41)

S_2 : Tensión normal en la dirección 2 (Figura 3.41)

S_{13} : Tensión de cortadura en un plano normal a la dirección 3; y en la dirección 1 (Figura 3.41)

S_{23} : Tensión de cortadura en un plano normal a la dirección 3; y en la dirección 2 (Figura 3.41)

T_g : Temperatura de transición vítrea

X_t : Resistencia a rotura a tracción en la dirección X

X_c : Resistencia a rotura a compresión en la dirección X

Y_t : Resistencia a rotura a tracción en la dirección Y

Y_c : Resistencia a rotura a compresión en la dirección Y

ZWM: *Zero waste manufacturing*

ν : Coeficiente de poisson de un material isótropo

ν_{xy} : Coeficiente de poisson en un plano normal a la dirección Y; y en la dirección X

ν_{xz} : Coeficiente de poisson en un plano normal a la dirección Z; y en la dirección X

ν_{yz} : Coeficiente de poisson en un plano normal a la dirección Z; y en la dirección Y

PUBLICACIONES

8 PUBLICACIONES

A continuación, se muestran las publicaciones que han dado lugar con la realización de la presente Tesis.

1. Diez-Barcenilla G, Gómez-Alonso JL, Gondra K, Zuza E. Epoxy tooling: Technologies, developments, sustainability and future interest to industry 4.0. *Polymers and Polymer Composites*. 2021; 29: 1649-1663. <https://doi.org/10.1177/09673911211059880>
2. Diez-Barcenilla G, Allue A, Gondra K, Zuza E. Epoxy matrix composites from waste for manufacturing tools for energy efficient moulding process. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02287-0>