

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de
Materiales



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



AIMPLAS

INSTITUTO TECNOLÓGICO
DEL PLÁSTICO

TESIS DOCTORAL

*Simulación y control de los procesos de transferencia de
resina en moldes flexibles mediante modelos de
permeabilidad equivalente*

Doctorando:

Enrique Díaz Escriche

Directores:

Dr. Juan Antonio García Manrique

Dra. Concepción Sanz Box

Septiembre 2012

A Elsa y a Jacobo

*Nunca dejéis de buscar la felicidad...
seguramente esté en el cajón del esfuerzo.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar al Instituto Tecnológico del Plástico, AIMPLAS, el apoyo para la realización de la presente tesis doctoral.

Los Institutos Tecnológicos de la Comunidad Valenciana son pieza clave en la complementariedad y transferencia al tejido empresarial del conocimiento generado en el ámbito universitario y, por lo tanto, un excepcional vehículo para el camino hacia la *sociedad del conocimiento*.

El presente trabajo ha sido realizado en su mayor parte en las instalaciones de AIMPLAS, con recursos del Instituto, buscando la aplicación industrial del mismo para la mejora de la competitividad de las empresas relacionadas con el sector de los materiales compuestos.

Agradecer también la dedicación de mis directores de tesis, Concha y Toño, sin cuyo apoyo, seguimiento y consejos no hubiera sido posible llegar hasta aquí. En particular, gracias Concha por tu *empuje* en los momentos de dudas. A Toño, excelente conocedor del ámbito de la fabricación con materiales compuestos, le debo sin duda su absoluta predisposición a ayudarme en este camino.

No quiero dejar de citar a la gente de Composites de AIMPLAS, en especial a David, por pasar conmigo algún que otro rato en la planta piloto.

Por supuesto siempre en mi pensamiento está mi familia, a quien seguramente no le diga nada el título del presente trabajo, pero que paradójicamente ha escrito conmigo su contenido. Son mi madre, mi mujer y mis hijos.

Gracias a todos.

Resumen

Los materiales compuestos de matriz polimérica (*composites*) han probado ser de gran utilidad en diversas aplicaciones frente a otros materiales tradicionales por su reducido peso y excelentes propiedades mecánicas y de resistencia química. Sin embargo, es necesario un mayor desarrollo para dotar a sus procesos productivos de la tecnología necesaria que permita reducir sus costes de fabricación y hacer los productos finales competitivos frente a otros materiales tradicionales, lo que permitiría aprovechar sus propiedades en beneficio de toda la sociedad.

El **objetivo** del presente trabajo es el desarrollo de una metodología original para el diseño óptimo de los procesos de transferencia de resina con ayuda de vacío en la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica. Se trata de un sistema experto que permite reducir el esfuerzo necesario para la optimización del proceso de fabricación y la eliminación de una estrategia basada en el ensayo y error en favor del prototipado virtual en el diseño de los utillajes necesarios.

En esta línea, los principales **antecedentes** centran los trabajos de investigación realizados hasta la fecha en dos grupos principales. Uno de ellos es el *Center for Composites Materials (CCM)* de la *Universidad de Delaware, USA* en el que el profesor S.G. Advani y sus colaboradores han realizado numerosos trabajos, consiguiendo el desarrollo de un software propio (*LIMS*) para la simulación y su aplicación en diferentes procesos de fabricación, así como técnicas de control del frente de flujo de resina. El

segundo es el *Chaire sur les composites à haute performance (CCHP)* de la *Universidad de Montreal (Canadá)* en el que el grupo de F. Trochu tiene una trayectoria tan notable como el primero. Para el desarrollo del presente trabajo se han realizado sendas estancias en ambos centros y se han mostrado los resultados de dichas colaboraciones en la *10th International Conference on Flow Processes in Composites Materials*, congreso internacional en el que además de S.G. Advani y F. Trochu, otros investigadores de reconocido prestigio tales como E. Ruiz, S. Bickerton, C. Binetruy y T. Lundström presentaron sus trabajos.

Para la puesta en marcha y validación del sistema experto se han desarrollado las siguientes **aportaciones originales**:

1. Se ha desarrollado y puesto en marcha un dispositivo experimental original para la caracterización de la permeabilidad *flexible* de preformas con el ánimo de desarrollar una estrategia de simulación rápida, con reducido esfuerzo computacional y limitada necesidad de determinación experimental de las características del refuerzo (permeabilidad) que permita el diseño preliminar de moldes de infusión con garantía de llenado de la cavidad y tiempos de ciclo reducidos.
2. Se ha puesto en marcha el banco de permeabilidad flexible con una serie de refuerzos típicamente utilizados en la tecnología de materiales compuestos, tales como *mats* de fibras continuas, tejidos multidireccionales, tejidos híbridos con núcleo para facilitar el paso de la resina y tejidos realizados con fibras de origen natural. Se estudia además en el presente trabajo cómo influyen los radios de curvatura del molde sobre elementos tales como núcleos en el flujo de la resina.
3. Se ha investigado también en el presente trabajo cómo monitorizar la posición del frente de flujo de resina y el grado de curado de la misma con el tiempo. Se han probado con éxito los sensores denominados de *flujo de calor* en dispositivos de *infusión*, que

permiten registrar la transferencia de energía debida, por un lado, a la diferencia de temperatura entre la resina y el molde a su paso por el sensor y, por otro, a la reacción de polimerización de la misma. Puede optimizarse el tiempo de ciclo de fabricación al producirse el desmoldeo una vez se ha alcanzado el grado de curado necesario.

4. Se ha utilizado un software comercial destinado a la simulación de los procesos LCM con molde y contramolde rígidos incluyendo el concepto de *permeabilidad flexible* para poner en marcha un sistema ágil, de reducido coste y fiable para la simulación de los procesos de transferencia de resina con ayuda de vacío que, como se explicará detalladamente, requieren de un coste computacional y de caracterización de las materias primas muy superior al propuesto en el presente trabajo.
5. Se han utilizado los valores de *permeabilidad flexible* determinados experimentalmente para la simulación del llenado de un molde de *infusión* para preformas realizadas con diferentes materias primas cuyos resultados han sido comparados con las experiencias correspondientes en planta piloto.

Los resultados parciales obtenidos en el desarrollo del presente trabajo se han expuesto en diferentes congresos científicos de ámbito nacional e internacional. En este sentido, se han mostrado los avances logrados en la sensorización de los procesos de transferencia de resina¹, el desarrollo del banco de *permeabilidad flexible* original², la influencia de la geometría del molde en las medidas de *permeabilidad flexible*³ y la validación de los métodos de caracterización de permeabilidad flexible frente a inyecciones en planta piloto⁴. Además, se han mostrado los primeros resultados relativos a investigaciones que forman parte de trabajos adicionales a la presente tesis⁵.

Es posible **concluir** que la metodología propuesta permite la simulación de los procesos de transferencia con ayuda de vacío con un coste

computacional y de caracterización de materias primas reducido frente a una solución analítica, permitiendo su implementación en un entorno industrial. Además, el sistema de control propuesto, permite compensar las desviaciones observadas asegurando un proceso de fabricación óptimo.

Abstract

In front of the traditional materials, polymeric matrix composites have demonstrated their suitability for a great number of applications. This is mainly due to their lightness, excellent mechanical properties and chemical resistance. However, today is still necessary an improvement in regards to the manufacturing processes of composites in order to reduce their costs and make them even more competitive materials, which will permit take advantage of their characteristics for the benefit of the whole society.

The main **objective** of the present work is the development of an original and innovative approach for the optimal design of the vacuum assisted *resin transfer moulding* processes as a suitable technology for composites manufacturing. It consists of an expert system which is able to reduce the necessary effort for the optimization of the process and to avoid the *trial and error* strategy in favour of the virtual prototyping in the development of the tools required.

Existing **background** on this topic is mainly on the research done up to date by two different groups: on one side is necessary to quote the *Center for Composites Materials (CCM)* from the *University of Delaware, USA*, in which the Professor S.G. Advani and col. have carried out many works in this field and the development of an original simulation software and several approaches for controlling the flow front of the resin in such manufacturing processes. On the other hand, the *Chaire sur les composites à haute performance (CCHP)* from the University of Montreal (Canada), which is led by F. Trochu, has a background as noticeable as the previous one. In order to develop the present research, the author has

been involved in the work carried out by both Centers on a daily basis during two different periods. The results have been shown in the 10th *International Conference on Flow Processes in Composites Materials (FPCM10)*, where not only Advani or Trochu but also international researchers as E. Ruiz, S. Bickerton, C. Binetruy and T. Lundström presented their works.

In order to set up and validate the expert system, the following **original contributions** have been carried out:

1. An original experimental set up has been developed for the characterization of the *flexible* permeability of preforms with the main aim of a fast simulation, with a reduced computational effort and limited necessity of experimental characterization of raw materials (mainly permeability), which permits the preliminary design of the infusion tools ensuring i. the complete filling of the cavity and ii. a reduced cycle time in the infusion process.
2. The *flexible* permeability bench has been set up with a serial of preforms typically employed in the technology of composite materials, such as continuous fibres mats, multidirectional fabrics, hybrid reinforcements with core to enhance the flow of the resin and natural fiber preforms. In addition, the influence of the curvature radii in the tools over the flow of the resin has been studied in the present work
3. It has also been studied in the present work a suitable approach for monitoring the position of the flow front and the curing degree of the resin. The so-called *heat flow sensors* have been successfully tested in the event of the infusion process. Such sensors permit the measurement of the heat transfer between the resin and the mould the energy generated by the polymerization reaction itself. It may be optimized the cycle time to produce a part because demoulding is done just in time.

4. A commercially available software for resin transfer moulding simulation has been employed for the simulation of the infusion process by incorporating the concept of *flexible* permeability. This means the development of a low cost, fast and reliable approach for the virtual prototyping of the vacuum assisted resin transfer moulding processes which, as will be explained later, require a higher cost in terms of computational effort and characterization than the one proposed in the present work
5. The experimental characterization of the *flexible* permeability has been employed for the simulation of the filling of an infusion mould by employing several preforms . The results obtained have been compared to the pilot plant experimental filling trials.

Partial results obtained throughout this work have been shown in several national and international scientific congresses. In this sense, the achievements in the sensorisation of the resin transfer moulding processes¹, the development of the *flexible permeability* bench², the influence on the characterization of the permeability by the geometry of the mould³, and the validation of the *flexible permeability* measurements by using pilot plant comparisons⁴ have been carried out. In addition, further tasks to those in the scope of the present thesis have also been introduced⁵.

At the light of the results it is possible to **conclude** that the proposed approach permits the simulation of the vacuum assisted resin transfer moulding processes with a low computational cost and a reduced characterization of raw materials when it is compared to the analytical solution. This permits its implementation in an industrial environment. In addition, the control system proposed is able to compensate the deviations between the simulation and the experimental observations.

Resum

Els materials compostos de matriu polimèrica (composites) han provat ser de gran utilitat en diverses aplicacions front a altres materials tradicionals pel seu reduït pes i excel·lents propietats mecàniques i de resistència química. No obstant això, és necessari un ampli desenvolupament per a dotar als seus processos productius de la tecnologia necessària que permeti reduir els costos de fabricació i fer els productes finals competitius front a altres materials tradicionals, el que permetria aprofitar les seues propietats en benefici de tota la societat.

L'**objectiu** del present treball és el desenvolupament d'una metodologia original per al disseny òptim dels processos de transferència de resina amb ajuda del buit en la fabricació de materials compostos de matriu polimèrica. Es tracta d'un sistema expert que permet reduir l'esforç necessari per a la l'optimització del procés de fabricació i l'eliminació d'una estratègia basada en assaig i error en favor del prototipat virtual en el disseny dels utilitatges necessaris.

En aquesta línia, els principals **antecedents** centren els treballs d'investigació realitzats fins ara en dos principals grups. Un d'ells és el *Center for Composites Materials (CCM)* de la *Universitat de Delaware, USA* en el que el professor S.G. Advani i els seus col·laboradors han realitzat nombrosos treballs, aconseguint el desenvolupament d'un software propi (*LIMS*) per a la simulació i la seua aplicació en diferents processos de fabricació, així com tècniques de control del front de flux de resina. El segon és *Chaire sur les composites à haute performance (CCHP)* de la *Universitat de Montreal (Canadá)* en el que el grup de F. Trochu té una

trajectòria tan notable com el primer. Per al desenvolupament del present treball s'han realitzat estàncies en ambdós centres i s'han mostrat els resultats de aquestes col·laboracions a la *10th International Conference on Flow Processes in Composites Materials*, congrés internacional al que a més de S.G. Advani i F. Trochu, altres investigadors de reconegut prestigi tals com E. Ruiz, S. Bickerton, C. Binetruy i T. Lundström presentaren els seus treballs.

Per a la posada en marxa i validació del sistema expert s'han desenvolupat les següents **aportacions originals**:

1. S'ha desenvolupat i posat en marxa un dispositiu experimental original per a la caracterització de la permeabilitat *flexible* de preformes amb l'ànim de desenvolupar una estratègia de simulació ràpida, amb reduït esforç computacional i limitada necessitat de determinació experimental de les característiques del reforç (permeabilitat) que permeta el disseny preliminar de motlles d'infusió amb garantia d'ompliment de la cavitat i temps de cicle reduïts.
2. S'ha posat en marxa el banc de permeabilitat flexible amb una sèrie de reforços típicament utilitzats a la tecnologia de materials compostos, tals com *mats* de fibres contínues, teixits multidireccionals, teixits híbrids amb nucli per a facilitar el pas de la resina i teixits realitzats amb fibra natural. S'estudia a més al present treball com influeixen els radis de curvatura del motlle amb elements com nuclis en el flux de la resina.
3. S'ha investigat també al present treball com monitoritzar la posició del front de flux de resina i el grau de curat de la mateixa amb el temps. S'han provat amb èxit els sensors denominats de *flux de calor* en dispositius d'infusió, que permeten registrar la transferència d'energia deguda, per un costat, a la diferència de temperatura entre la resina i el motlle al seu pas pel sensor i, per un altre, a la reacció de polimerització de la mateixa. Pot optimitzar-se

el temps de cicle de fabricació al produir-se el desmoldeig una volta s'ha aconseguit el grau de curat necessari.

4. S'ha utilitzat un software comercial destinat a la simulació dels processos LCM amb motlle i contramotlle rígids incloent el concepte de *permeabilitat flexible* per a posar en marxa un sistema àgil, de reduït cost i fiable per a la simulació dels processos de transferència de resina amb ajuda de buit que, com s'explicarà detingudament, requereixen d'un cost computacional i de caracterització de les matèries primes molt superior al proposat al present treball.
5. S'han utilitzat els valors de *permeabilitat flexible* determinats experimentalment per a la simulació de l'ompliment d'un motlle d'infusió per a preformes realitzades amb diferents matèries primes, aquestos resultats han estat comparats amb les experiències corresponents en planta pilot

Els resultats parcials obtinguts al desenvolupament del present treball s'han exposat a diferents congressos científics d'àmbit nacional e internacional. En aquest sentit, s'han mostrat el avanços aconseguits amb la sensorització dels processos de transferència de resina¹, el desenvolupament del banc de *permeabilitat flexible* original², la influència de la geometria del motlle en les mesures de *permeabilitat flexible*³ i la validació dels mètodes de caracterització de permeabilitat flexible front a injeccions en plant pilot⁴. A més, s'han mostrat els primers resultats relatius a investigacions que formen part de treballs addicionals a la present tesis⁵.

Es possible **concloure** que la metodologia proposada permet la simulació dels processos de transferència amb ajuda de buit amb un cost computacional i de caracterització de matèries primes reduït front a una solució analítica, permetent la seua implantació en un entorn industrial. A més, el sistema de control proposat, permet compensar les desviacions observades garantint un procés de fabricació òptim.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| Resumen | 5 |
| Abstract | 9 |
| Resum | 12 |
| | |
| Capítulo 1. Introducción | 17 |
| 1.1.- Introducción | 17 |
| 1.2.- Composites de matriz polimérica | 23 |
| 1.3.- Aplicaciones de los materiales compuestos | 47 |
| 1.4.- Fabricación de materiales compuestos mediante procesos LCM | 55 |
| 1.5.- Sensorización y control de los procesos LCM. Reducción de la variabilidad inherente al proceso mediante la automatización | 89 |
| 1.6.- Conclusiones | 103 |
| | |
| Capítulo 2.- Objetivos de la investigación | 106 |
| | |
| Capítulo 3. Metodología de Trabajo | 110 |
| 3.1.- Permeabilidad Flexible | 110 |
| 3.2.- Implementación de sensores thermoflux en planta piloto | 124 |
| 3.3.- Metodología para la simulación del proceso de infusión y comparación con los resultados experimentales | 126 |
| | |
| Capítulo 4. Resultados y Discusión: Sensorización y Simulación de los procesos VARTM con <i>permeabilidad flexible</i> . | 136 |
| 4.1.- Introducción | 136 |
| 4.2.- Puesta en marcha del banco de <i>permeabilidad flexible</i> | 139 |
| 4.3.- Sensores de Flujo de Calor. Experimental | 150 |
| 4.4.- La simulación del llenado frente a la inyección en planta piloto | 160 |
| | |
| Capítulo 5.- Conclusiones y Trabajos Futuros | 177 |
| 5.1.- Conclusiones | 177 |
| 5.2.- Trabajos futuros. | 179 |
| | |
| Anexo I Fichas técnicas de sensores de flujo de calor y accesorios | 181 |

| | |
|---|-----|
| Anexo II Fichas técnicas de materiales empleados en el experimental | 186 |
| Referencias | 187 |

Capítulo 1. Introducción

1.1.- Introducción

La dependencia de combustibles fósiles para el transporte de bienes y personas y la generación eléctrica en base a fuentes no renovables y peligrosas son dos de los problemas más importantes a los que se enfrenta la sociedad actual. El desarrollo de materiales de reducido peso y altas prestaciones mecánicas puede contribuir de forma notable a la solución de dichos problemas:

- 1) Por un lado el desarrollo de vehículos más ligeros reduce de forma notable su consumo energético. Un parque automovilístico en el que predominen los vehículos ligeros prolonga las reservas de petróleo disponibles (en base a un menor consumo). Además, al reducir el peso se aumenta notablemente la autonomía de los modernos vehículos eléctricos, lo que permitiría la reducción drástica de consumo de derivados del petróleo.
- 2) Para la generación de energía eléctrica renovable de forma limpia y segura, la tecnología eólica ha demostrado en los últimos años un gran potencial. La eficiencia de los equipos necesarios para

transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica aprovechable en hogares, industria, locales comerciales, transporte ferroviario y, en los próximos años, vehículos eléctricos es inversamente proporcional al peso de las palas del aerogenerador.

Los materiales compuestos de matriz polimérica (*composites*) han probado ser de gran utilidad en diversas aplicaciones frente a otros materiales tradicionales por su reducido peso y excelentes propiedades mecánicas y de resistencia química. Sin embargo, es necesario un mayor desarrollo para dotar a sus procesos productivos de la tecnología necesaria que permita reducir sus costes de fabricación y hacer los productos finales competitivos frente a otros materiales tradicionales, lo que permitiría aprovechar sus propiedades en beneficio de toda la sociedad.

Existen diversas tecnologías que se utilizan a nivel industrial para la fabricación de composites. En todas ellas un polímero impregna un refuerzo en forma de fibras dispuestas en el espacio en función de la dirección de las cargas que deba soportar el material. Por ejemplo, pueden colocarse las fibras dispuestas al azar para simular el comportamiento de un material isótropo (tal como el aluminio o el acero). Sin embargo, lo que distingue a los materiales compuestos de los materiales tradicionales es la posibilidad de obtener materiales anisótropos, en los que las fibras se orientan de manera ordenada en la dirección de las cargas a soportar en servicio. Esto último permite optimizar todavía más si cabe el peso del material, colocando fibras sólo donde son necesarias.

La forma tradicional para la fabricación de composites se conoce como *laminado manual*. Sobre una superficie a modo de molde se colocan las fibras secas que son impregnadas de forma manual por los constituyentes del polímero. La reacción de polimerización que tiene lugar una vez impregnadas las fibras resulta en un sólido con la forma deseada. Este tipo de proceso, si bien sirvió para la validación inicial de la utilidad de los materiales compuestos en diversos sectores, tiene una serie de

inconvenientes que impide hacerlos competitivos para la industria en general:

- 1) Necesita de una gran cantidad de mano de obra para la impregnación de las fibras. El coste de fabricación de volúmenes de fabricación medios y grandes queda gravemente penalizado. Hoy en día, este método es competitivo sólo para pequeñas series o incluso piezas únicas.
- 2) La repetitividad es limitada y depende del personal que fabrica la pieza.
- 3) Se realiza a molde abierto, lo que conlleva emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) a la atmósfera. Este tipo de compuestos son peligrosos y debe limitarse su inhalación y vertido a la atmósfera.

Los procesos a molde cerrado, en los que la fibra en forma de preforma es colocada en el interior del molde y la resina se inyecta en la cavidad una vez el molde ha sido cerrado permiten, a costa de una mayor inversión inicial, reducir las desventajas del laminado manual:

- 1) La intervención del operario es sensiblemente inferior. Su actividad se limita a la colocación de la preforma en el interior del molde y la supervisión de la inyección. Las posibilidades de automatización del proceso aumentan. Es posible fabricar más piezas por unidad de tiempo.
- 2) Las tolerancias dimensionales se reducen, puesto que la cavidad del molde marca las dimensiones finales de la pieza.
- 3) La emisión de COVs durante el proceso de fabricación se reduce drásticamente, al quedar el polímero o resina confinados al interior de la cavidad del molde. Únicamente en el proceso de desmoldeo se produce la emisión de compuestos volátiles que no han sido incorporados a las cadenas del polímero.

En la actualidad, existen diferentes tipos de procesos de transferencia de resina o *liquid composite moulding* (LCM) que pueden ser seleccionados principalmente en base al tamaño y número de piezas a fabricar de una misma serie. Se utiliza generalmente un proceso LCM con molde y contramolde rígidos cuando estos son pequeños y la serie de fabricación es larga. Sin embargo, a medida que el número de piezas idénticas a fabricar disminuye o el tamaño de las mismas aumenta, es más ventajoso utilizar un molde rígido estático y un contramolde flexible en los que se produce el cierre gracias a la acción del vacío. Es el conocido proceso de *infusión* que detallará posteriormente.

Para poder poner en marcha un dispositivo de fabricación LCM de la forma más competitiva posible, es necesario tener un control preciso sobre los siguientes procesos:

- 1) El diseño de los puntos de inyección de resina y salida del aire ocluido en la preforma debe permitir el llenado completo de la cavidad y, por lo tanto, la impregnación de toda la preforma. Además, el número y posición de dichos puntos característicos del molde resultará en un tiempo de llenado concreto, por lo que la optimización de los mismos reducirá los costes de fabricación de las piezas.
- 2) La monitorización de la posición del frente de flujo de resina permite llevar a cabo estrategias complejas de inyección, útiles en cavidades de grandes dimensiones. De esta manera, puede comenzar la inyección por un punto del molde y continuar por otro en función de cómo avance el frente de flujo, por ejemplo, lo que puede llevar a un llenado completo en un tiempo menor.
- 3) El grado de curado de la resina es el parámetro que determina el momento a partir del cual es posible el desmoldeo y, por lo tanto, la inyección de una nueva pieza. Proceder al desmoldeo en el momento oportuno reduce el coste de fabricación de la pieza.

En el presente trabajo se han abordado diversas tecnologías para la optimización de los tiempos de ciclo de fabricación de piezas de materiales compuestos mediante el proceso de *infusión*.

Por un lado, se ha desarrollado y puesto en marcha un dispositivo experimental original para la caracterización de la permeabilidad *flexible* de preformas con el ánimo de desarrollar una estrategia de simulación rápida, con reducido esfuerzo computacional y limitada necesidad de determinación experimental de las características del refuerzo (permeabilidad) que permita el diseño preliminar de moldes de infusión con garantía de llenado de la cavidad y tiempos de ciclo reducidos.

Se ha puesto en marcha el banco de permeabilidad flexible con una serie de refuerzos típicamente utilizados en la tecnología de materiales compuestos, tales como *mats* de fibras continuas, tejidos multidireccionales, tejidos híbridos con núcleo para facilitar el paso de la resina y tejidos realizados con fibras de origen natural. Se estudia además en el presente trabajo cómo influyen los radios de curvatura del molde sobre elementos tales como núcleos en el flujo de la resina.

Se ha investigado también en el presente trabajo cómo monitorizar la posición del frente de flujo de resina y el grado de curado de la misma con el tiempo. Se han probado con éxito los sensores denominados de *flujo de calor*, que permiten registrar la transferencia de energía debida, por un lado, a la diferencia de temperatura entre la resina y el molde a su paso por el sensor y, por otro, a la reacción de polimerización de la misma. Puede optimizarse el tiempo de ciclo de fabricación al producirse el desmoldeo una vez se ha alcanzado el grado de curado necesario.

Por otro lado, se ha utilizado un software comercial destinado a la simulación de los procesos LCM con molde y contramolde rígidos y el concepto de *permeabilidad flexible* para poner en marcha un sistema ágil, de reducido coste y fiable para la simulación de los procesos de transferencia de resina con ayuda de vacío que, como se explicará

detalladamente, requieren de un coste computacional y de caracterización de las materias primas muy superior al propuesto en el presente trabajo.

Finalmente se han utilizado los valores de *permeabilidad flexible* determinados experimentalmente para la simulación del llenado de un molde de *infusión* para preformas realizadas con diferentes materias primas cuyos resultados han sido comparados con las experiencias correspondientes en planta piloto.

1.2.- Composites de matriz polimérica

Los materiales compuestos o *composites* están formados por la combinación de dos o más materiales de distinta naturaleza. Generalmente, uno de los constituyentes realiza la función de matriz, mientras que, al menos, otro material realiza la función de refuerzo. La matriz realiza las funciones de protección del *composite* frente a los agentes externos mientras que el refuerzo se encarga de mejorar sus propiedades mecánicas. Las propiedades del material compuesto resultante de tal combinación le permiten ser útil en un gran número de aplicaciones de una forma ventajosa a los materiales convencionales.

La familia de materiales compuestos más empleada actualmente es la que está formada por una matriz polimérica (principalmente resinas de poliéster, viniléster o epoxi) y unos refuerzos en forma de fibras de diferente naturaleza (vidrio, carbono o aramida). Este tipo de compuestos se distinguen principalmente por su:

- Resistencia química frente a los agentes externos
- Bajo peso
- Alta resistencia mecánica

Como hemos mencionado previamente, las propiedades mecánicas de un material compuesto dependen básicamente de las propiedades del refuerzo pero también de la forma en que éste se une a la resina empleada, las propiedades de la resina y la fracción de refuerzo en el sistema global, así como de la orientación de las fibras. La figura 1 muestra una comparación básica de los principales tipos de fibras cuando se usan en un *preimpregnado* de altas prestaciones de fibra de carbono unidireccional con resina epoxi, a fracciones de refuerzo típicamente conseguidas en aplicaciones aeronáuticas.

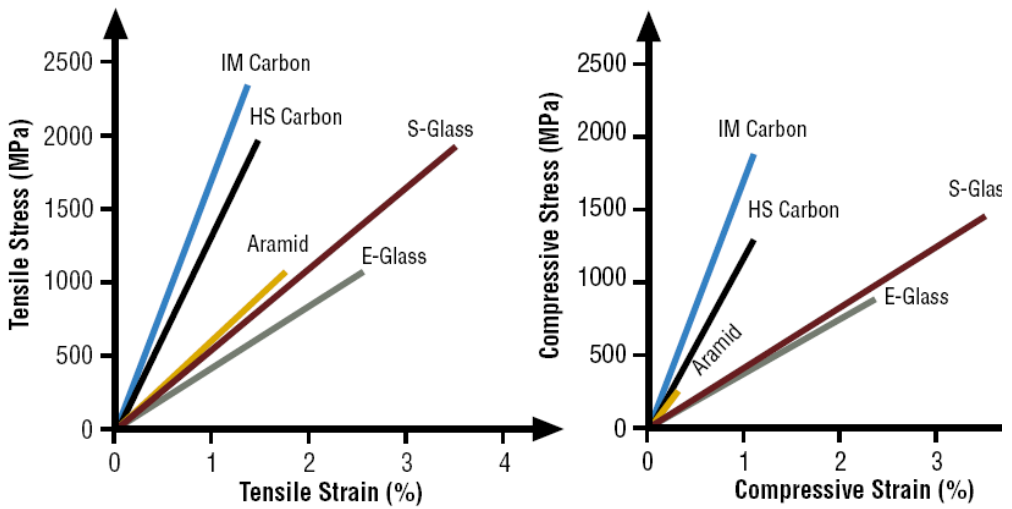


Figura 1.- Propiedades a tracción y compresión de un preimpregnado de carbono unidireccional

Estas gráficas muestran las máximas deformaciones y tensiones de diferentes composites a fallo. La pendiente de cada recta muestra la rigidez (módulo) del composite. Las gráficas también muestran como fibras tales como la aramida se comportan de manera muy diferente al estar sometidos a tracción o a compresión.

El coste de las diferentes materias primas utilizadas de forma general en la industria de los materiales compuestos presenta considerables variaciones. Si bien la fibra de vidrio, utilizada de forma general, presenta un coste muy competitivo, los refuerzos de altas prestaciones, tales como la fibra de aramida o carbono, tienen un coste muy superior (figura 2).

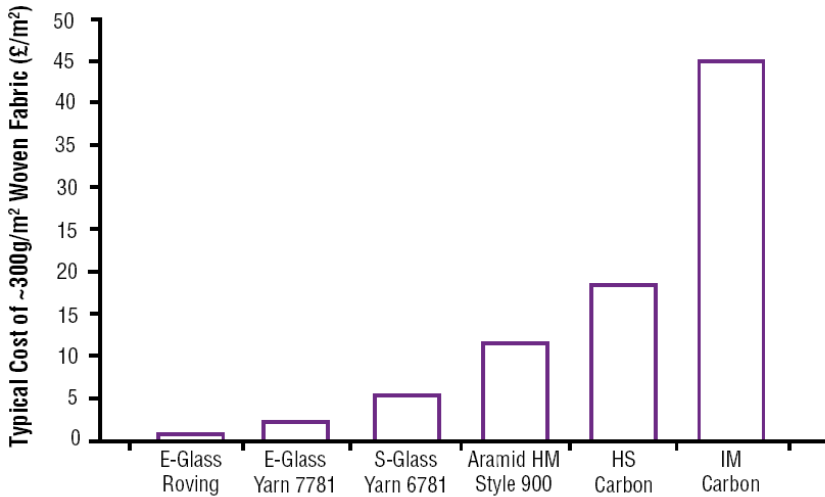


Figura 2.- Coste de diferentes refuerzos

El éxito de un material compuesto se basa en el empleo de diferentes componentes, cada uno de los cuales ejerce una función determinada en el conjunto. A pesar de que sea la fibra de refuerzo la que aporta las propiedades resistentes, se hace necesario el empleo de una resina polimérica (de tipo termoplástico o termoestable) para poder llevar a cabo el procesado o moldeado del compuesto con la geometría y dimensiones deseadas (figura 3). Por ello, el papel de la matriz es igualmente importante que el de la fibra o elemento de refuerzo.

Las funciones de la matriz son numerosas y a tener en cuenta:

Actúa como soporte de las fibras permitiendo moldear las fibras de la forma adecuada.

Protege las fibras frente agentes externos (luz, humedad, agentes químicos,...).

Soporta esfuerzos de compresión en los que las fibras no trabajan.

Transmite esfuerzos a las fibras mediante cortadura.

Evita la propagación de grietas durante el proceso de fractura.

Mantiene alineadas las fibras para que actúen en las direcciones predeterminadas.
Da coherencia y estabilidad al compuesto.

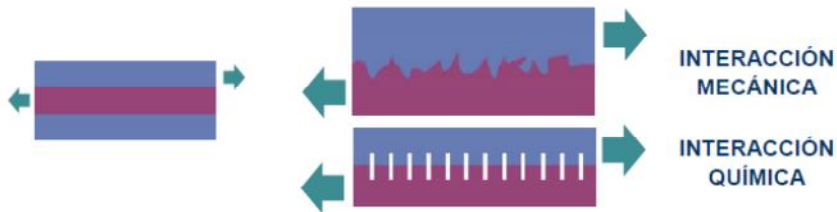


Figura 3.- Representación esquemática de la interacción fibra – matriz en un material compuesto

Para que matriz y elemento de refuerzo trabajen de forma sinérgica es necesaria una buena adhesión en la interfase fibra-matriz (figura 3). Por ello, es conveniente que la matriz presente buenas propiedades adhesivas ya que ello asegura una buena interacción entre los componentes.

La utilidad de los materiales compuestos se centra, fundamentalmente, en sus excelentes prestaciones mecánicas y elevada ligereza. Los fenómenos de refuerzo se muestran de forma esquemática en la figura 4, figura 5 y figura 6 que corresponden a los procesos de deformación de la matriz polimérica, la fibra de refuerzo y el compuesto. Un análisis detallado de estos gráficos permite entender la necesidad de una buena interacción en la interfase fibra-matriz para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.

La figura 4 muestra el diagrama de tracción (tensión-deformación) de un material polimérico. La línea de color rojo representa el nivel de tensión requerido para conseguir una determinada deformación o alargamiento. Cuando este material se somete a un nivel de tensión relativamente bajo (σ_1), según el diagrama de tracción, este material se deformará en una cantidad correspondiente a ϵ_{1m} pero no romperá. No obstante, si se aplica un nivel de tensión superior al de la rotura (el punto de rotura del material viene definido por el último punto o punto máximo en la curva del ensayo

de tracción) como por ejemplo, σ_2 , esta tensión es superior a la que puede soportar el material y, consecuentemente, romperá. Lógicamente, para un nivel de tensión superior como σ_3 , el material rompe, ya que se supera el máximo alargamiento permitido en el material.

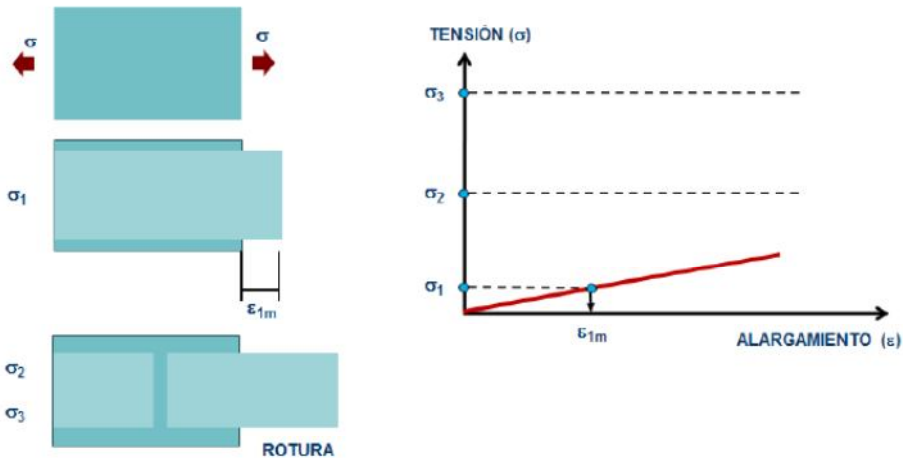


Figura 4.- Representación del comportamiento a tracción de una matriz polimérica.

En relación al comportamiento mecánico de la fibra de refuerzo, la figura 5 muestra el diagrama de tracción (línea de color azul) correspondiente a esta. Fácilmente se aprecia que se trata de un material con mucha mayor rigidez que la matriz plástica, es decir, que requiere mayores niveles de tensión para alcanzar los mismos niveles de deformación que la matriz plástica. Cuando este material se somete al nivel de tensión designado como σ_1 , se deforma en muy poca extensión (ϵ_{1f}) pero al no superar la tensión de rotura o punto de rotura, la fibra no rompe. Si la tensión aplicada sobre la fibra se incrementa hasta niveles de σ_2 , según el diagrama de tracción, no se produce fractura en la fibra y se deforma hasta niveles de ϵ_{2f} . Si por el contrario, se aplica una tensión (σ_3) superior a la tensión de rotura de la fibra, lógicamente, esta se fractura y parte.

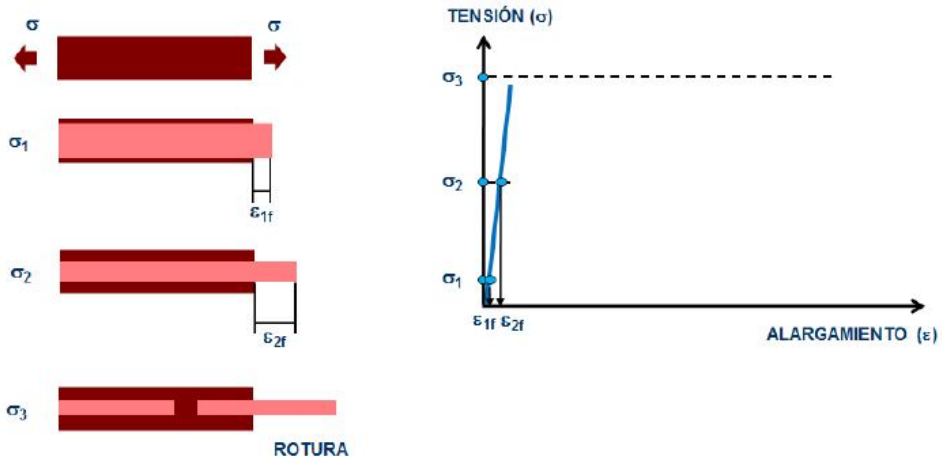


Figura 5.- Representación esquemática del comportamiento a tracción de un elemento de refuerzo (fibra)

Hasta ahora se ha llevado a cabo el análisis individual de cada uno de los componentes que forman el material compuesto. Cuando se combina la matriz polimérica con la fibra de refuerzo el comportamiento mecánico es muy interesante tal y como se aprecia en la figura 6. Cuando se aplica el nivel de tensión más bajo (σ_1) al material compuesto, pueden ocurrir dos supuestos que marcan claramente la importancia de los fenómenos en la interfase fibra-matriz.

Supuesto 1. No se produce interacción en la interfase fibra-matriz. Si no hay interacción – adhesión en la interfase fibra-matriz, cada uno de los materiales se comportará mecánicamente de forma individual; así, la fibra se deformará ϵ_{1f} y la matriz lo hará en una cantidad mayor (ϵ_{1m}). En estas condiciones, como la deformación de cada una de los materiales es diferente, se produce una separación física entre la fibra y la matriz dando lugar a la fractura del compuesto. Esta situación, lógicamente no es deseable cuando se trabaja con este tipo de materiales ya que no se aprovecha la sinergia en la combinación de los diferentes componentes.

Sería posible moldear la pieza con un material compuesto de estas características pero las propiedades mecánicas no serían las deseadas.

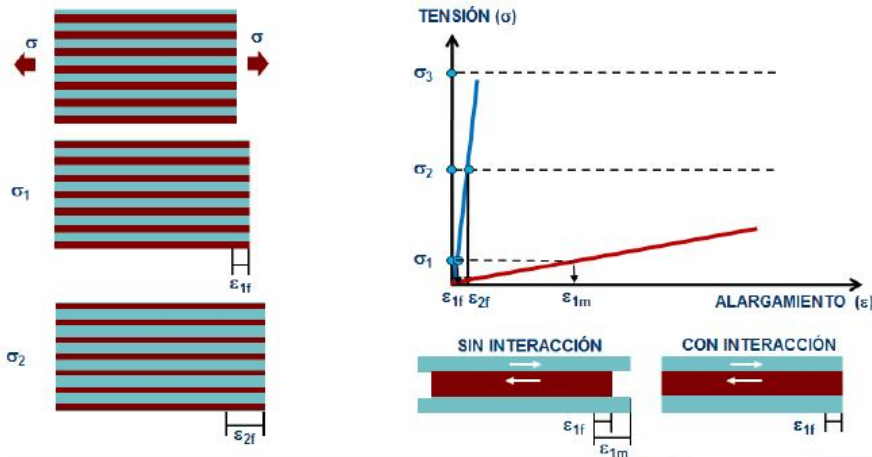


Figura 6.- Comportamiento mecánico a tracción de un *composite* de matriz polimérica y refuerzo de fibra.

Supuesto 2. Se produce interacción en la interfase fibra-matriz. Por el contrario, cuando se produce una buena o total interacción en la interfase fibra-matriz, es decir, existe buena adhesión entre los componentes, la fibra se deforma en una cantidad equivalente a lo que indica su diagrama de tracción (ϵ_{1f}) y la matriz, al estar completamente adherida a la fibra de refuerzo, lo hará en la misma extensión (ϵ_{1f}), de tal manera que en estas condiciones, la matriz prácticamente no trabaja desde el punto de vista mecánico y es solamente la fibra la que actúa como elemento resistente. El material compuesto ha actuado de forma sinérgica entre sus constituyentes. Ahora bien, como se ha descrito, para que este fenómeno ocurra es necesario que fibra y matriz se deformen de forma coherente, es decir, se exige una buena adhesión entre los componentes y ello repercute en una mejora de las prestaciones globales del material compuesto.

Si se incrementa la tensión hasta valores del orden de σ_2 , si ambos materiales trabajaran de forma individual, no habiendo interacción entre fibra y matriz, esta última rompería y la fibra se deformaría una cierta cantidad. No obstante, si los fenómenos de interacción en la interfase son fuertes, la fibra se deformará la cantidad que marca el diagrama de tracción (ϵ_{2f}) y la matriz lo haría en la misma cantidad, de tal manera que no se supera el punto de rotura de la matriz. Si, por último, aplicamos una tensión superior a la de fractura de la fibra (σ_3), lógicamente cuando se supera la tensión de rotura de la fibra esta se parte e inmediatamente la matriz pasa a soportar todo el esfuerzo, que es muy superior a su tensión de rotura y, consecuentemente, también falla.

El comportamiento sinérgico de los constituyentes de los materiales compuestos les permite competir con ventaja en diferentes aplicaciones. La tabla 1 muestra las propiedades mecánicas de diferentes materiales compuestos y la de otros materiales tradicionales⁶.

Tabla 1.- Comparación de las propiedades mecánicas de composites con otros materiales

| Material | Densidad (Mg m ⁻³) | Módulo de Young (GN m ⁻²) | Resistencia a tracción (MN m ⁻²) | Alarga- miento de rotura (%) | Coeffic. dilatación térmica (10 ⁻⁶ °C ⁻¹) | Mod. Young específico Mod. Young/ Densidad (GN m ⁻³) | Resistencia a tracción específica R.T./Dens. (MN m ⁻²) | Estabilidad térmica (° C) |
|--|-----------------------------------|---|--|---------------------------------------|---|--|--|---------------------------------|
| Aleación Al-Zn-Mg de alta resistencia | 2,80 | 72 | 503 | 11 | 24 | 25,7 | 180 | 350 |
| Acero templado y reveni- do de baja aleación | 7,85 | 207 | 2050-6000 | 17-23 | 11 | 26,4 | 261-76 | 300 |
| Nimonic 90 (Aleación con base de níquel) | 8,18 | 204 | 1200 | 26 | 16 | 24,9 | 147 | 1100 |
| Nylon 6.6 | 1,14 | 2 | 70 | 60 | 90 | 1,8 | 61 | 150 |
| Nylon-vidrio (V _f = 0,25) | 1,47 | 14 | 207 | 2,2 | 25 | 9,5 | 141 | 170 |
| Fibra de carbono-resina epoxi en láminas unidi- reccionales (V _f = 0,60) | | | | | | | | |
| (i) paralelo a las fibras | 1,62 | 220 | 1400 | 0,8 | -0,2 | 135 | 365 | 260 |
| (ii) perpend. a las fibras | 1,62 | 7 | 38 | 0,6 | 30 | | | |
| Fibra de vidrio-resina de poliéster en láminas unidireccionales (V _f = 0,50) | | | | | | | | |
| (i) paralelo a las fibras | 1,93 | 38 | 750 | 1,8 | 11 | 19,7 | 390 | 250 |
| (ii) perpend. a las fibras | 1,93 | 10 | 22 | 0,2 | | | | |
| Fibra de vidrio-poliéster fibras en disposición planar al azar (V _f = 0,20) | 1,55 | 8,5 | 110 | 2 | 25 | 5,5 | 71 | 230 |

Nota: V_f es la fracción de volumen de fibra.

Un material compuesto está constituido por la combinación de materiales de distinta naturaleza. Dicha combinación debe ofrecer una además la

suficiente interacción entre los materiales para poder actuar de forma sinérgica. De forma general, uno de los materiales realiza la labor de matriz que confiere al conjunto resistencia química y da forma al *composite*), otro realiza de la acción de refuerzo que soporta la mayor parte de los esfuerzos mecánicos. Existen también otros materiales adicionales en proporciones variables pueden realizar funciones de reducción de coste, conocidos como *cargas*, o de mejora de propiedades concretas. En este último caso se denominan *aditivos*. Cuando se busca obtener piezas de considerable espesor para conferir al conjunto cierta rigidez manteniendo un reducido peso, es posible la inclusión de *núcleos* entre capas o laminados de *composite*. Siguiendo esta clasificación, es posible encontrar materiales con la composición que se muestra en la tabla 2

Tabla 2.- Componentes típicos de los materiales compuestos

| CONSTITUYENTE | ORIGEN | EJEMPLO |
|---------------|------------|--|
| REFUERZO | Orgánico | p-aramidas, m-aramidas, polietileno, carbono |
| | Inorgánico | Vidrio, boro |
| | Metálico | Acero, aluminio |
| | Cerámico | Carburo de silicio, alúmina |
| | Natural | Lino, cáñamo, yute |
| MATRIZ | Metálica | Aluminio, magnesio, titanio |
| | Cerámica | Carburo de silicio, carbono |
| | Polimérica | Termoestable |
| | | Termoplástica |
| | | Elastomérica |

De entre las distintas posibilidades recogidas en la tabla 2, el alcance del presente trabajo se limita a los procesos de transferencia de resina llevados a cabo con materiales compuestos de matriz polimérica termoestable y refuerzos de fibra de vidrio y naturales. Estos últimos se han incluido en el alcance por encontrar en los últimos años cierto grado

de aplicación como sustitutos a los refuerzos tradicionales, ofreciendo su utilización un menor impacto sobre el medio ambiente.

Se detallan a continuación las características principales de las materias primas utilizadas para la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica.

1.2.1.- Resinas

Los polímeros termoestables se obtienen mediante procesos de reticulación bien de otros polímeros de menor peso molecular o bien de monómeros, en forma de resinas líquidas. En función del tipo de resina, la reacción de reticulación se activa por la presencia de un sistema catalítico. Si bien la mayoría de las resinas presentan una reacción de polimerización exotérmica, el calor aumenta la cinética de la reacción, hecho que es utilizado para la reducción de los ciclos de fabricación.

Estos polímeros adoptan la estructura de red tridimensional unida mediante enlaces de tipo covalente, por lo que una vez formado el polímero, no es posible volver a la situación inicial con un nuevo aporte de calor. Los polímeros termoestables por lo tanto, a diferencia de los termoplásticos, no pueden ser fundidos y reprocesados cíclicamente mediante aporte de calor.

Entre las resinas que mayor interés despiertan en la fabricación de materiales compuestos, merece la pena destacar las siguientes familias:

Epoxi: resinas de altas prestaciones mecánicas y excelente adherencia al refuerzo. Permiten la obtención de composites con la mayor proporción de refuerzo. Ampliamente utilizados en sectores exigentes de alto valor añadido tales como la industria aeronáutica-aeroespacial, deporte y energía eólica.

Poliéster: resinas de uso general que ofrecen un amplio abanico de características. Presentes en la mayoría de los sectores.

Viniléster: de química similar al poliéster, se diferencian por su alta resistencia química, lo que les permite cubrir aplicaciones de protección superficial de otros materiales compuestos.

Fenólicas: se diferencian por su alta resistencia a la temperatura y capacidad de aislamiento eléctrico, por lo que están presentes en sectores tales como el eléctrico/electrónico y ferroviario, entre otros.

PI (poliimida): presentes en aplicaciones aeroespaciales para *composites* de alta temperatura (250-400°C).

En la figura 7 se muestra la estructura química de diversos tipos de resinas termoestables entrecruzadas. De entre todas ellas, merece la pena destacar el empleo de las resinas epoxídicas en aplicaciones de materiales compuestos para altas prestaciones en combinación con tejidos y otros refuerzos de fibra de carbono y aramida y las resinas de poliéster insaturado (UP) ampliamente utilizadas en combinación con fibra de vidrio (tejidos y *mats*) en sectores industriales.

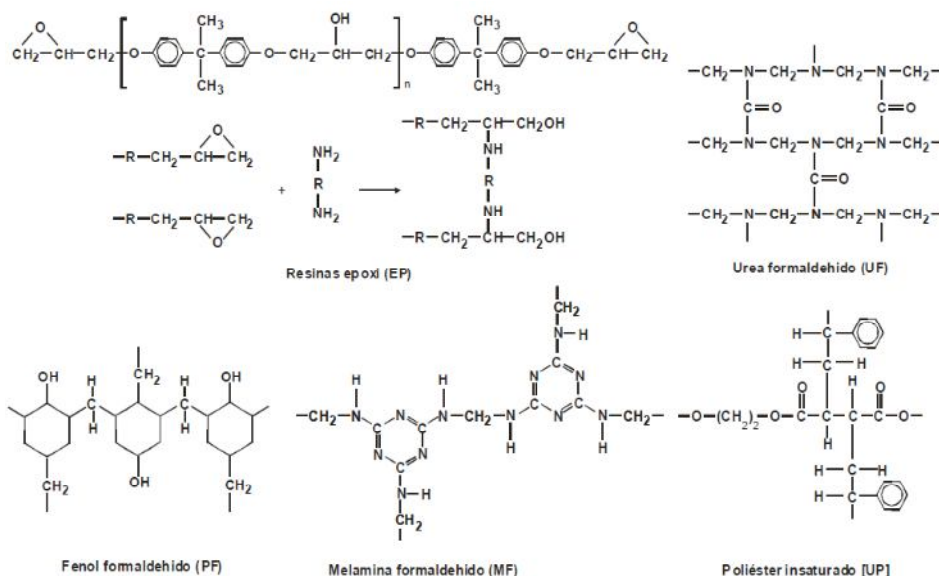


Figura 7.- Estructura química de las principales resinas termoestables

1.2.2.- Núcleos

Los núcleos permiten incrementar la sección de la pieza fabricada, lo que aumenta la rigidez de la misma, sin incurrir en los problemas de degradación térmica de la pieza debida a la exotermia de la reacción de polimerización de la resina. Además, por regla general el precio del núcleo es menor que el de la resina y refuerzo necesarios para sustituirlo, por lo que se consigue de la misma manera aumentar la competitividad de la pieza fabricada frente a otras fabricadas con materiales tradicionales.

Los núcleos más utilizados para formar este tipo de panel sándwich son los de madera de balsa y las celdas de PVC con diferentes disposiciones y tamaños (figura 8). La superficie de ambos productos deben ser cubiertas con una capa de imprimación antes de su uso, de tal forma que se evite su impregnación por la resina, reduciendo así el peso final del *composite*. Para poder adaptar el núcleo a la forma de la pieza final, éste tiene unos cortes de forma transversal y longitudinal de unos 25 x 50 mm.



Figura 8.- Madera de balsa y núcleos de espuma de PVC

Los materiales del núcleo deben encajar unos con otros sin que queden huecos entre ellos. Estos huecos, además de aumentar sin ningún tipo de beneficio el porcentaje de resina en el producto final, suponen canales de alta permeabilidad que hacen impredecible el flujo de la resina en el

interior del molde. En el presente trabajo se ha realizado un apartado experimental dedicado a intentar predecir este tipo de comportamiento.

La figura 9 muestra un laminado con núcleo bajo una carga a flexión. Este laminado actuaría de forma similar a la de una viga en I, en la cual las pieles del laminado actúan a modo de envolvente exterior que protege al núcleo que trabaja como una red anti-cizalla. Bajo este tipo de esfuerzo, puede verse que la piel exterior actúa a compresión mientras que la inferior está sometida a un esfuerzo de tracción. De ello se desprende que una de las principales propiedades que debe ofrecer un núcleo es su resistencia a cizalla.

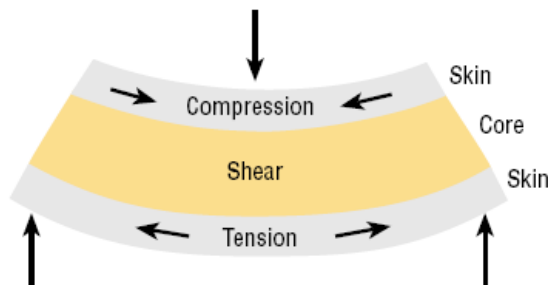


Figura 9.- Laminado con núcleo bajo esfuerzo a cizalla

1.2.3.- Refuerzos

El último grupo de materiales que es necesario considerar en este apartado y, tal vez, el más importante es el de los refuerzos. Los refuerzos más utilizados en la tecnología de fabricación de materiales compuestos son las de fibras de vidrio y carbono, aunque progresivamente otros tipos de refuerzo van ganando terreno por sus especiales características. Entre ellos cabe citar los refuerzos de fibra de aramida y las fibras naturales. En el presente trabajo se ha prestado especial atención a las fibras de vidrio (refuerzo de uso mayoritario en los procesos de transferencia de resina con ayuda de vacío) y las fibras naturales, cuyo desarrollo en los últimos años

puede reducir aún más si cabe el impacto ambiental derivado de la fabricación y uso de los materiales compuestos.

La misión del refuerzo en un material compuesto es, fundamentalmente, mejorar las propiedades mecánicas del laminado final. Las fibras utilizadas en la tecnología de *composites* tienen diferentes propiedades, por lo que afectan de distinta manera a las propiedades finales del compuesto. Más adelante serán detalladas las propiedades de las diferentes fibras. Sin embargo, las fibras individuales como tal o agrupadas en forma de roving sólo son empleadas en unos pocos procesos de transformación de materiales compuestos tales como el *filament winding* o la *pultrusión*. Para la mayor parte de las aplicaciones, las fibras necesitan ser dispuestas conjuntamente y unidas en cierta manera en forma de tela o tapiz, conocido como *tejido*, para poder manejarlas convenientemente. Son posibles diferentes formas de unir las fibras y es posible orientarlas de diferente manera dando como resultado diferentes tipos de tejidos, cada uno con características propias.

Las propiedades mecánicas de las fibras de refuerzo son considerablemente superiores a las de la resina. De esta manera, las propiedades mecánicas del sistema compuesto están dominadas por la contribución de la fibra al *composite*. Los factores principales que determinan la contribución de la fibra son:

- i. Las propiedades mecánicas de la fibra
- ii. La interacción superficial fibra – resina
- iii. La cantidad de fibra en el *composite* (fracción másica o volumétrica de fibra)
- iv. La orientación de la fibras en el laminado

Las propiedades mecánicas de las fibras más comunes empleadas en la tecnología de materiales compuestos se muestran en la tabla 3. La interacción superficial de fibra y resina viene dada por el grado de enlace que existe entre ambas, que a su vez depende del tratamiento superficial

dado a la fibra. Es lo que se conoce como *ensimaje*. El porcentaje de refuerzo en el composite depende del tipo de proceso de transformación utilizado y la forma en que se disponen las fibras para formar un tejido; refuerzos en forma de tejido con un alto nivel de empaquetamiento de las fibras proporcionarán fracciones volumétricas de fibra más altas en un laminado que aquellos formados por un tejido basto o con relativamente grandes huecos entre las fibras. El diámetro de las fibras es un factor importante ya que diámetros pequeños ofrecen mayores áreas superficiales y mayor nivel de empaquetamiento aunque a un coste económico superior. Como regla general, resistencia y rigidez de un laminado aumentan proporcionalmente al porcentaje de fibra de refuerzo que lo compone. Esto es válido hasta porcentajes por encima del 70%, a partir de los cuales si bien la rigidez continúa aumentando, la resistencia alcanza un máximo y comienza a decrecer debido a la falta de resina para impregnar completamente las fibras.

Tabla 3.- Propiedades mecánicas de las fibras utilizadas comúnmente para la fabricación de composites

| Tipo Material | Resistencia a Tracción (MPa) | Módulo Elástico (GPa) | Densidad (kg/L) | Módulo Específico (GPa / kg) |
|--|------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| Carbono Alta Resistencia (HS) | 3500 | 160-270 | 1.8 | 90-150 |
| Carbono Módulo Intermedio (IM) | 3500 | 270-325 | 1.8 | 150-180 |
| Carbono Alto Módulo (HM) | 3500 | 325-440 | 1.8 | 180-240 |
| Carbono Ultra – Alto Módulo (UHM) | 200 | >440 | 2.0 | >200 |
| Aramida Bajo Módulo (LM) | 3600 | 60 | 1.45 | 40 |

| Tipo Material | Resistencia a Tracción (MPa) | Módulo Elástico (GPa) | Densidad (kg/L) | Módulo Específico (GPa / kg) |
|--|------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| Aramida Alto Módulo (HM) | 3100 | 120 | 1.45 | 80 |
| Aramida Ultra – Alto Módulo (UHM) | 3400 | 180 | 1.47 | 120 |
| Vidrio E | 2400 | 69 | 2.5 | 27 |
| Vidrio S2 | 3450 | 86 | 2.5 | 34 |
| Vidrio Cuarzo | 3700 | 69 | 2.2 | 31 |
| Aluminio | 400 | 1069 | 2.7 | 26 |
| Titanio | 950 | 110 | 4.5 | 24 |
| Acero | 450 | 205 | 7.8 | 26 |
| Acero Inoxidable | 800 | 196 | 7.8 | 25 |
| Acero HS | 1241 | 197 | 7.8 | 25 |

Finalmente, dado que las fibras realizan su función en dirección longitudinal, las propiedades mecánicas son altamente dependientes de la orientación de las fibras. Este comportamiento anisótropo puede ser utilizado con ventaja en el diseño de piezas de materiales compuestos, con la mayoría de las fibras dispuestas en la orientación de las cargas, lo que minimiza la cantidad de material redundante dispuesto para resistir cargas que a las que no se a ver sometido.

Fibra de Vidrio

El vidrio líquido se obtiene de la mezcla de materiales de cantera tales como arena (sílice), caolín y piedra caliza a alta temperatura (1600°C). Este líquido se hace pasar a través de mallas de microporos y se enfría para obtener filamentos de entre 5 y 24 micras de diámetro. Estos filamentos son dispuestos juntos en forma bien de trenzas, bien de mechas (*roving*) y cubiertos con un recubrimiento que proporciona cohesión entre los hilos y protege el vidrio de la abrasión. Variando el porcentaje de los

constituyentes pueden obtenerse diferentes tipos de fibra de vidrio. Los más utilizados como materiales estructurales son los siguientes:

Vidrio E o eléctrico. De menor contenido en álcali y mayor resistencia que el **vidrio A**. Ofrece razonablemente buenas propiedades de resistencia y rigidez a tracción y compresión, excelentes propiedades de aislamiento eléctrico y bajo coste, aunque resistencia al impacto relativamente baja. El vidrio E es el más ampliamente utilizado como refuerzo en la tecnología de materiales compuestos.

Vidrio C o químico. Alta resistencia al ataque de sustancias químicas. Suele utilizarse en forma de velo superficial en los laminados empleados en la fabricación de tanques y depósitos.

Vidrio R, S ó T. Son nombres comerciales del mismo tipo de vidrio de mayor resistencia a la tracción y rigidez que el vidrio E. Este hecho, unido a su baja producción hacen que el precio sea unas 10 veces superior al vidrio E.

Teniendo en cuenta la disposición de las fibras podemos distinguir:

Mat de hilos (continuos o discontinuos)

Tejido Uniaxial

Tejido Biaxial

Tejido Multiaxial

Mat de hilos

Este tipo de tejido está compuesto por hilos continuos de fibra de vidrio (excepcionalmente material de otra naturaleza) orientados al azar en múltiples capas que apilan unas encima de otras con el uso de un adhesivo (en forma sólida o líquida). Este tipo de disposición aleatoria de las fibras hace que los porcentajes totales de refuerzo raramente superen el 30% del volumen total de tejido. Cuando se utilizan este tipo de tejidos en procesos

de transferencia de resina, el resto del volumen lo ocupa la propia resina, que alcanza de esta manera porcentajes muy elevados.



Figura 10.- Mat de hilos de Fibra de Vidrio

Este tipo de tejidos - no tejidos - pese a tener los inconvenientes del reducido porcentaje final de refuerzo, que implica una menor resistencia mecánica y mayor exotermia en el curado de la resina, ofrece las ventajas de dotar al producto final de cierta isotropía de propiedades mecánicas a un precio relativamente bajo (figura 10).

Tejido Uniaxial o Unidireccional (UD)

Un tejido Uniaxial o *Unidireccional* dispone la mayoría de sus fibras alineadas en una sola dirección. En este tipo de tejidos es usual encontrar que una pequeña proporción de las fibras tiene una orientación distinta a la principal, pero con el único objetivo de mantener la alineación del resto de fibras. En cuanto a la proporción de fibras que siguen la misma dirección en este tipo de tejidos, existe cierta discrepancia entre los fabricantes. Mientras que algunos consideran que un tejido es unidireccional cuando, al menos, el 75% de las fibras sigue la misma dirección otros proveedores exigen a sus productos un mínimo del 90% de fibras en la misma dirección.

Por regla general, este tipo de tejidos tiene su dirección principal en urdimbre, es decir, los filamentos están mayoritariamente orientados en la dirección en la que se enrolla la bobina. Los tejidos unidireccionales nos permiten colocar el refuerzo en la dirección en la que los requerimientos mecánicos de la pieza final sean mayores. Además, podemos colocar la cantidad óptima de refuerzo, sin exceso de fibra en direcciones no deseadas. En cuanto a propiedades mecánicas, sólo las cintas de *prepregs* unidireccionales pueden mejorar el tejido unidireccional, ya que es la propia resina pre-polimerizada quien mantiene los hilos en su dirección principal. De hecho, los tejidos preimpregnados ofrecen la fracción volumétrica en refuerzo más alta posible.

Existen varios métodos para mantener las fibras en su dirección principal, dando así diferentes productos tales como el tejido propiamente dicho o *weaving*, el cosido o *stitching* y el pegado o *bonding*. Al igual que en los otros tipos de tejidos, la calidad superficial de un tejido unidireccional queda determinada por dos factores principales: la combinación del *título* y *número de hilos* de cada fibra principal y la cantidad y tipo de la fibra secundaria. Por otro lado, aspectos tales como la elasticidad, la suavidad y la estabilidad dependen fundamentalmente del método de fabricación, mientras que el gramaje y la porosidad dependen más de la apropiada combinación entre el *título* y el número de fibras unidad de área.

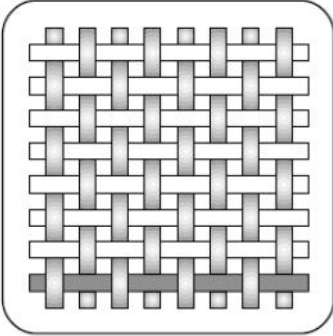
Tejido Biaxial

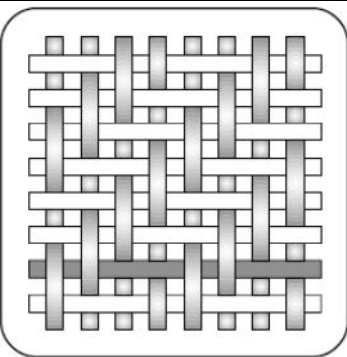
Para aplicaciones donde se necesiten varias orientaciones distintas de las fibras (por requerimientos de uso) se utilizan con mucha frecuencia tejidos $0^\circ/90^\circ$. Estos pueden estar realizados, tal como se ha comentado previamente, bien por el *entrecruzamiento* de rovings en direcciones perpendiculares (o tejidos tipo *woven*), bien por la superposición en el plano de tejidos unidireccionales con distinta orientación y posterior cosido de las capas (o tejidos tipo *knitted*) o bien por el pegado de las distintas capas (o *bonding*). Si bien los primeros son ampliamente utilizados en la tecnología del *composite* en general, en la fabricación de productos con

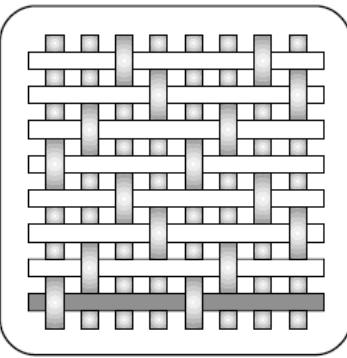
grandes moldes, tales como cascos de barco o palas de aerogenerador, tienen mayor aplicación los productos *non-woven* donde el porcentaje de refuerzo final en la pieza es mayor (debido a la mayor compactación de la fibra).

Tejido Biaxial. Woven

Este tipo de tejidos es producido mediante el entrecruzamiento de fibras en dirección urdimbre (0°) y trama (90°) siguiendo un patrón regular. La integridad del tejido se mantiene por el propio entrecruzamiento de las fibras. La conformabilidad del tejido, es decir, su capacidad de adaptación a superficies irregulares, así como la suavidad superficial y la estabilidad dependen en gran medida del patrón de entrecruzamiento. En función de dicho patrón, los tejidos biaxiales pueden clasificarse como:

| Tafetán | |
|---|--|
| <p>Cada roving en dirección de urdimbre pasa alternativamente sobre y por debajo de un roving en dirección de trama. El tejido es simétrico, con buena estabilidad y porosidad razonable. Sin embargo, el tafetán es el más difícil de conformar y además, el alto nivel de ondulaciones de la fibra disminuye las propiedades mecánicas del producto final en comparación con otro tipo de tejidos (figura 11)</p> |  <p>Figura 11.- Tafetán</p> |

| Sarga | |
|---|--|
| <p>Una o más fibras de la urdimbre pasan alternativamente sobre dos o más fibras de la trama de una forma repetitiva. Esto produce un efecto visual de orientación diagonal del tejido. La humectabilidad y el conformado son mejores en este tipo de tejidos con una mínima reducción de la estabilidad. Como el <i>rizado</i> u ondulado debido al entrecruzamiento es menor, la sarga ofrece mayor suavidad superficial y mejora las propiedades mecánicas del producto final (figura 12).</p> |  |
| <p>Figura 12.- Sarga</p> | |

| Satén | |
|--|---|
| <p>Este tipo de tejidos son básicamente una modificación de la sarga con menos puntos de entrecruzamiento urdimbre/trama. Los tejidos tipo satén son muy lisos, disfrutan de una buena humectabilidad y conformado. La baja ondulación de sus fibras hace que las propiedades mecánicas del laminado sean altas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los satenes tiene por el contrario menor estabilidad y simetría que otros tipos de tejido. Esta asimetría provoca que una cara del tejido tenga la mayoría de las fibras orientadas en urdimbre mientras que la otra cara dispone de sus fibras mayoritariamente orientadas en la dirección de la trama (figura 13).</p> |  |
| <p>Figura 13.- Satén</p> | |

Tejido Multiaxial

En los últimos años los tejidos multiaxiales han comenzado a tener gran aceptación entre los fabricantes de *composites*. Estos tejidos están formados por una o más capas de fibras unidas entre sí por un hilo cosido (que no tiene función estructural) de poliéster. Suele utilizarse este material por su equilibrada proporción entre coste y propiedades (de unión

entre las capas). El sistema de cosido permite una gran variedad de orientaciones de las fibras frente a las típicas $0^\circ/90^\circ$ de los tejidos entrelazados. Los tejidos multiaxiales tienen las siguientes características:

- Mejores propiedades mecánicas, en primer lugar porque las fibras no están entrelazadas y, en segundo lugar, porque es posible orientarlas en tantas direcciones como sea necesario (apilando capas).
- Menor tiempo necesario para el laminado. Los tejidos pueden hacerse más gruesos incluyendo distintas orientaciones de las fibras, lo que conlleva un menor tiempo de preparación del laminado.
- Las fibras de poliéster no son del todo compatibles con ciertos sistemas de resinas por lo que las *puntadas* pueden actuar en determinadas situaciones como inicio de fallo del material. El proceso de producción del tejido suele ser más lento y la maquinaria más cara que en el caso de tejidos entrelazados.

Fibras Naturales

Existe una gran variedad de fibras naturales que pueden ser utilizadas como refuerzos o cargas en composites. En la tabla 4 se indican las propiedades mecánicas de las fibras naturales más importantes, así como del refuerzo mayormente utilizado en la actualidad⁷ (fibra de vidrio).

Tabla 4.- Propiedades fibras naturales

| Tipo de fibra | Densidad (kg/m ³) | Módulo (GPa) | Resistencia a tracción (MPa) |
|-------------------|-------------------------------|--------------|------------------------------|
| Fibra de vidrio E | 2550 | 73 | 2400 |
| Cáñamo | 1480 | 70 | 550 – 900 |
| Lino | 1400 | 60 – 80 | 800 – 1500 |
| Yute | 1460 | 10 – 30 | 400 – 800 |
| Sisal | 1330 | 38 | 600 – 700 |
| Algodón | 1510 | 12 | 400 |

En los últimos años ha surgido un especial interés en la producción de este tipo de fibras en Europa, con una producción de lino y cáñamo a nivel Europeo durante los años 2004-2005 de 21.152 y 233.734 toneladas respectivamente.

La utilización de fibras naturales como sustituto de las fibras de vidrio o de carbono dentro de estos materiales compuestos supondría una técnica adecuada, económicamente favorable y limpia. Las fibras naturales ofrecen como ventaja un bajo peso específico, una resistencia mecánica más alta que las fibras de vidrio y un recurso renovable con un balance nulo en la emisión de gases nocivos o de efecto invernadero (CO₂) durante su ciclo de vida. Además, su obtención requiere muy poca energía y se pueden producir con un bajo coste.

Es necesario tener en cuenta para seleccionar fibras naturales en la fabricación de biocomposites, la obtención de una adecuada compatibilidad con el polímero. La selección de las matrices se puede ver limitada a polímeros con bajos picos exotérmicos. Esto es debido al hecho de que la degradación de las fibras naturales empieza alrededor de 160°C, redundando en una descomposición de ceras. Cuando la temperatura está por encima de 230 °C la celulosa se descompone rápidamente. Esto provoca una reducción de la resistencia de la fibra, afectando

inevitablemente a las propiedades mecánicas del composites final. Las claves para minimizar esta degradación incluyen bajas temperaturas de procesado y bajos tiempos de residencia.

1.3.- Aplicaciones de los materiales compuestos

Si bien las aplicaciones iniciales de estos materiales se centraron en el sector aeronáutico y aeroespacial, hoy en día estos materiales compiten y, en muchas ocasiones, substituyen a materiales utilizados tradicionalmente en ingeniería en aplicaciones en diversidad de sectores entre los que merece la pena destacar los siguientes:

- Automoción
- Aeronáutico
- Medicina
- Sector eléctrico-electrónico
- Materiales para equipos deportivos
- Edificación exterior e interior
- Sector ferroviario
- Sector náutico

AUTOMOCIÓN

Las continuas crisis energéticas han contribuido a la amplia utilización de materiales compuestos en el sector automoción, debido a la necesidad de reducir las tasas de consumo energético en aspectos como aerodinámica, peso del vehículo y rendimiento del motor.

Los criterios de aplicación de los materiales compuestos en el sector transporte son los siguientes:

- Libertad de formas frente a materiales metálicos que deben transformarse por laminación, embutición, soldadura,...
- Reducción de peso. Uno de los objetivos primordiales en el sector transporte.

- Amplia gama de productos. La amplia gama de resinas, fibras, tipologías de fibras,... aporta al ingeniero una amplia variedad de materiales técnicos capaces de satisfacer las exigencias del diseño.
- Reducción del número de piezas.
- Los procesos de transformación de los materiales compuestos permiten obtener formas y geometrías complicadas en una sola operación de conformado.
- Mejor comportamiento frente a la corrosión.
- Economía de consumo. Estos materiales aportan soluciones que son consecuencia de otras características como formas aerodinámicas, ahorro del peso y todo ello repercute en una mejora del rendimiento global.
- Acondicionamiento interior.
- Excelente acondicionamiento acústico.

Las aplicaciones de los materiales compuestos en el sector automoción abarcan una amplia variedad de piezas entre las cuales, podemos citar las siguientes:

- *Carrocerías y exterior*
 - *Front end*, soporte del radiador, parachoques y vigas de parachoques, capó, techo, techo solar, *spoiler*, aletas, puerta trasera, portón, paneles de puerta, paneles de carrocería, chasis, tapa maletero, suelo de carga, alojamiento de la rueda de repuesto, ruedas, parábolas de faros, depósitos y conductos de combustible, etc.
- *Piezas interiores*
 - Panel de mandos, rejilla de aireación, alojamiento de la cerradura de contacto, pedales, asientos, elementos de elevación, etc.

- *Piezas bajo capot*
 - Disco de transmisión, ventilador y tapa de ventilador, soporte de pedal de freno, cubiertas balancines, correa dentada, caja del filtro de aire, *cárter*, tapa de la bomba de gasolina, depósito del radiador, encapsulado del motor, voluta de turbo alimentación, etc.
- *Piezas estructurales*
 - Árbol de transmisión, ballestas, cofres de batería, eje de transmisión, etc.

SECTOR AERONÁUTICO

El empleo de estos materiales en el sector aeronáutico/aeroespacial adquiere especial relevancia en tanto en cuanto aportan soluciones de bajo peso frente a los materiales tradicionales, que permite:

Un incremento de carga a transportar

Una mayor velocidad y autonomía de vuelo

La economía de peso oscila entre un 25 y un 40 %. El empleo de materiales compuestos permite obtener piezas más complejas sin necesidad de complicados ensamblajes.

Las matrices más empleadas son las resinas epoxi ya que combinan un excelente comportamiento térmico con elevada estabilidad dimensional y las fibras más habituales suelen ser de altas prestaciones como la de carbono, aramidas, polietileno, boro y, para algunas aplicaciones, fibras de vidrio.

Entre otras, algunas de las aplicaciones de los materiales compuestos en este sector se describen a continuación.

Estabilizadores horizontales

Timón de dirección y de profundidad

Carenados de los actuadores de los alerones y *flaps*

- Suelo de carga
- Fuselaje
- Hélice de propulsión
- Elementos estructurales
- Componentes del motor
- Tanques de combustible de lanzadera espacial
- Estructuras secundarias

SECTOR MÉDICO

En el sector médico, los materiales compuestos ofrecen flexibilidad en los diseños, reducción de piezas ensambladas y ligereza. Algunas de las aplicaciones son las siguientes.

- Pulmones de acero
- Prótesis
- Brazos voladizos extensibles
- Máscaras faciales de alta resistencia al impacto

SECTOR ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

En cuanto al empleo de los materiales compuestos en sectores de alto contenido tecnológico como el eléctrico-electrónico, las ventajas que ofrecen los materiales compuestos frente a otros ampliamente utilizados en dichos sectores se centran, de nuevo, en la ligereza, excelentes propiedades de aislamiento eléctrico y posibilidad de fabricación de piezas de grandes dimensiones con bajo peso.

Algunas de las aplicaciones son las siguientes:

- Carcasas de micrófonos
- Placas de circuitos electrónicos

- Antenas parabólicas
- Carcasas aislantes y protectoras de equipos de medición
- Escaleras para manipulación de conducciones eléctricas
- Falcos de motores eléctricos
- Barras de separación de transformadores en seco
- Soportes de catenarias de conducción

Además, su uso en la fabricación de partes y componentes de pequeños electrodomésticos es creciente debido a la libertad de formas y excelentes niveles de aislamiento. Entre otras aplicaciones, se emplea en:

- Pequeños aparatos (planchas, cafeteras, tostadoras,...)
- Partes de lavadoras
- Sistemas de aire acondicionado
- Bases de frigoríficos
- Cubas de lavavajillas

SECTOR OCIO-DEPORTE

Este es uno de los sectores pionero en el desarrollo de materiales compuestos avanzados. El continuo reto por batir marcas obliga al empleo de materiales con prestaciones cada vez mayores. Ligereza, diseños ergonómicos y elevada rigidez mecánica, son criterios clave en el desarrollo de nuevos materiales compuestos aptos para una amplia gama de piezas relacionadas con el sector ocio-deporte, entre las cuales, podemos citar:

- Raquetas de tenis
- Palos de golf
- Cascos y mástiles de barcos
- Tablas de surf
- Esquí
- Balizas
- Cañas de pescar

Listones de salto de altura, vallas, pértigas Ultraligeros

SECTOR EDIFICACIÓN

Teniendo en cuenta las excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico de los materiales compuestos, su utilización en el sector de la construcción es creciente ya que aportan soluciones de bajo peso y elevados niveles de absorción acústica y térmica. Algunas aplicaciones son las siguientes:

- Tabiquería

- Mamparas de separación

- Aislamiento térmico

- Postizos, antepechos de ventana, fachadas, refuerzo de pilares, tuberías

- Tuberías de mediano y gran diámetro para la conducción de agua de riego, de abastecimiento o residual

SECTOR FERROVIARIO

Además de su utilización en el sector automoción, todos los sectores de transporte (terrestre, marítimo y aéreo), requieren el empleo de materiales compuestos ya que aligeran las estructuras con niveles de resistencia y rigidez mecánica similares a otros materiales utilizados tradicionalmente. El sector ferroviario ha hecho y hace un uso extensivo de estos materiales en diferentes aplicaciones como:

- Marcos de ventana

- Tapas

- Tabiques

- Techos

- Cuadros de mandos
- Componentes de carrocerías
- Carenado delantero
- Cubiertas
- Faldones de carenado

SECTOR NÁUTICO

De nuevo por las características de resistencia mecánica y ligereza, los materiales compuestos han encontrado aplicación dentro del sector náutico. Además, la resistencia química que es posible conferirle al *composite* con la selección de la matriz adecuada, le hace apto para una vida en servicio en constante contacto con el ambiente agresivo que supone el entorno marino.

De forma general, pueden encontrarse materiales compuestos en embarcaciones recreativas (independientemente de su tamaño) y en buques destinados a la pesca y vigilancia marina con tamaños de hasta 20 metros de eslora. Las principales secciones de las embarcaciones fabricadas con materiales compuestos son las siguientes:

- Casco completo
- Mamparos
- Estructuras divisorias (paneles entre camarotes, puertas, etc.)
- Escaleras
- Cubiertas

SECTOR EÓLICO

En los últimos años, la necesidad por la generación eléctrica de forma sostenible ha hecho que la fabricación de componentes para equipos de generación de energía eólica haya experimentado un avance muy

importante en el sector de los materiales compuestos. La potencia instalada en España ha crecido año tras año en porcentajes superiores al 10% anual. Además, últimos acontecimientos tales como el accidente nuclear de Fukushima, han puesto en relieve la necesidad de conseguir formas de generación limpias y sostenibles, tales como dicha energía eólica.

La eficiencia en la generación eléctrica (o dicho de otro modo, la cantidad de energía que se puede generar para una velocidad del aire dada) es inversamente proporcional al peso de las palas (o hélices) del generador. Por lo anterior, los materiales compuestos son el material ideal para constituir la propia pala. Otros elementos tales como la carcasa (o *nacelle*) que cubre el generador y otros elementos adyacentes, también se fabrican con materiales compuestos por su ligereza y resistencia (facilita el montaje en altura).

1.4.- Fabricación de materiales compuestos mediante procesos LCM

Durante el año 2010 se produjeron en Europa 1.015 kt de materiales compuestos⁸. Se estima que existen unas 10.000 empresas relacionadas directamente con la transformación de composites, las cuales dan empleo a unos 100.000 trabajadores. A estas cifras habría que añadir las relacionadas con la fabricación, comercialización y distribución de materias primas y equipos productivos, así como las ingenierías y centros de investigación.

Para la fabricación de aproximadamente el 25% de la cantidad total de materiales compuestos producidos en Europa se utilizan procesos de molde abierto. En este tipo de técnicas se utiliza un semi-molde o soporte donde se depositan las preformas de refuerzo que son impregnadas de forma *abierta* a la atmósfera de trabajo. Los compuestos orgánicos volátiles (COVs), (compuestos con presión de vapor igual o superior a 10Pa a 293.15K) que forman parte de la resina líquida, principalmente estireno, pasan a estado gaseoso, aumentando su concentración en el ambiente de trabajo. La *Directiva 1999/13/CE*⁹ y su trasposición mediante el Real Decreto 117/2003¹⁰, así como la *Directiva 2004/42/EC*¹¹ limitan la exposición de los trabajadores a dichos COVs estableciendo los denominados *límites de exposición*. Si bien existe cierta controversia en cuanto al alcance de dichas directivas en relación a la fabricación de materiales compuestos, el desarrollo de la sociedad del bienestar debe progresar hacia ambientes de trabajo cada vez más saludables, por lo que es de esperar que la limitación a la emisión de COVs aumente progresivamente.

En dicho entorno se espera que la tecnología de transformación de materiales compuestos tienda a abandonar procesos de molde abierto por procesos de molde cerrado. En concreto, los procesos *Liquid Composite Moulding (LCM)* pueden sustituir al molde abierto en cualquiera de sus

variantes actuales: es posible fabricar cualquier pieza que en la actualidad se esté realizando por molde abierto utilizando procesos de transferencia de resina. Si bien este tipo de procesos encuentra aplicación cuando el número de piezas a fabricar permita recuperar el mayor coste de inversión debido a la fabricación de útiles, la creciente presión legislativa relacionada con la emisión de COVs en el ambiente de trabajo, puede llegar a obligar a seleccionar los procesos *LCM* incluso cuando se pretenda fabricar sólo una pieza de composite de grandes dimensiones.

Los procesos *LCM* pueden definirse de forma general como aquellos en los que la resina es transferida hacia la cavidad de un molde cerrado (gracias a cierto gradiente de presión) donde ha sido colocada previamente una preforma de refuerzo en forma de *mat* o tejido. Una vez ha terminado la impregnación de la preforma, comienza la polimerización de la resina, cuyo grado de avance determina el momento de apertura del molde y extracción de la pieza. Existen diversos procesos *LCM* y cierta controversia en su nomenclatura. El proceso *RTM*¹² (*Resin Transfer Moulding*) consiste en un molde y contramolde rígido en el que se inyecta la resina a presión constante o a caudal constante (figura 14).

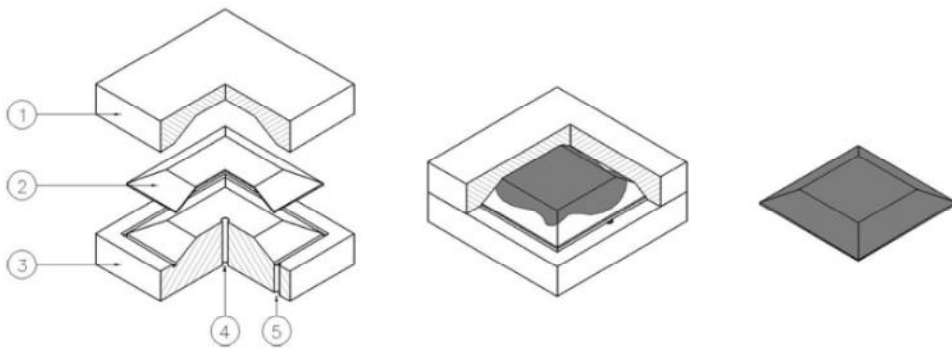


Figura 14.- Esquema del proceso RTM. 1.- Contramolde rígido, 2.- Preforma, 3.- Molde rígido, 4.- Punto de inyección, 5.- Venteo.

Una variante de este mismo proceso, el *VARTM* (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*) utiliza la misma configuración de molde pero con presiones manométricas negativas en la cavidad. El vacío permite, por un

lado, aumentar la fuerza impulsora de la resina y, por otro, extraer el aire inicialmente existente en la preforma, reduciendo así la posibilidad de producirse defectos en la pieza debidos a la presencia de aire ocluido.

Otra variante del mismo proceso, el *RTM-Light* utiliza vacío en condiciones similares al VARTM, pero en este caso la configuración del molde consiste en un semi-molde inferior rígido y un semi-molde superior flexible. El cierre de molde y contramolde se consigue también gracias a la acción del vacío en una cavidad perimetral especialmente diseñada para ello. La fuerza de cierre, equivalente a la diferencia de presiones entre la existente en la cavidad de cierre y en la atmosférica por la sección de la cavidad, debe ser superior a la correspondiente a la cavidad de la preforma, que tiende a abrir el molde.

Dentro de los procesos LCM con semi-molde flexible y vacío en la cavidad existe la posibilidad de utilizar una bolsa de vacío, que en realidad es una delgada membrana impermeable polimérica, para realizar el cierre de la cavidad. En este caso el proceso se conoce como *Vacuum Infusion (VI)*, VARTM (en conflicto con la nomenclatura presentada anteriormente) o simplemente, *Infusión*¹³. El esquema del proceso se muestra en la figura 15.

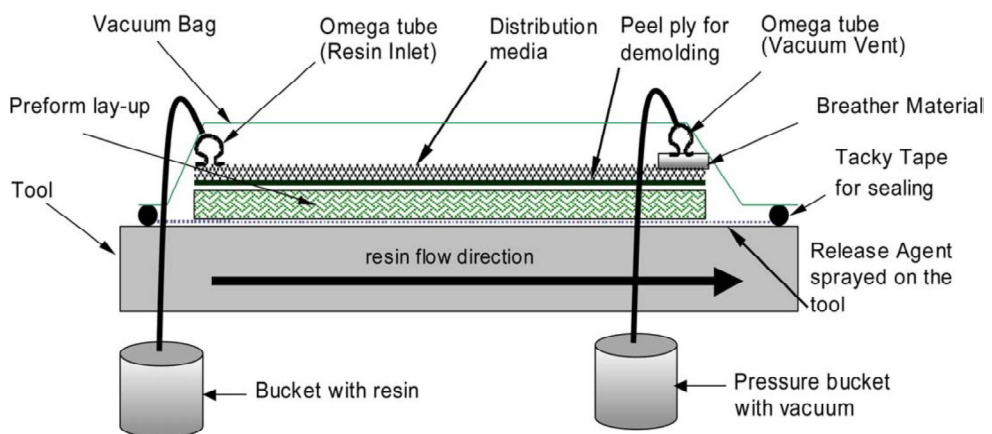
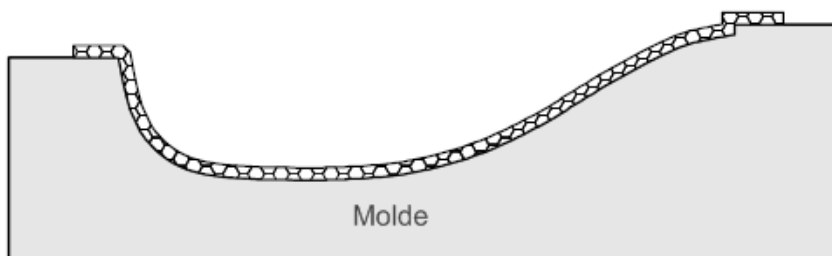


Figura 15.- Esquema del proceso de infusión

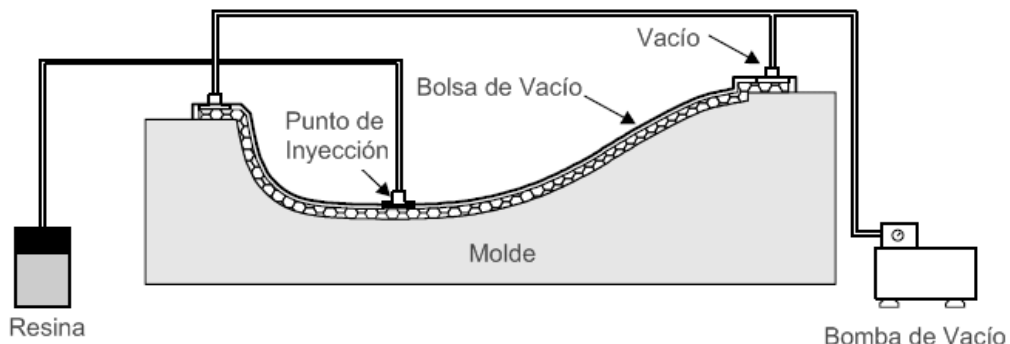
En la figura 16 se muestra un esquema del proceso de infusión.



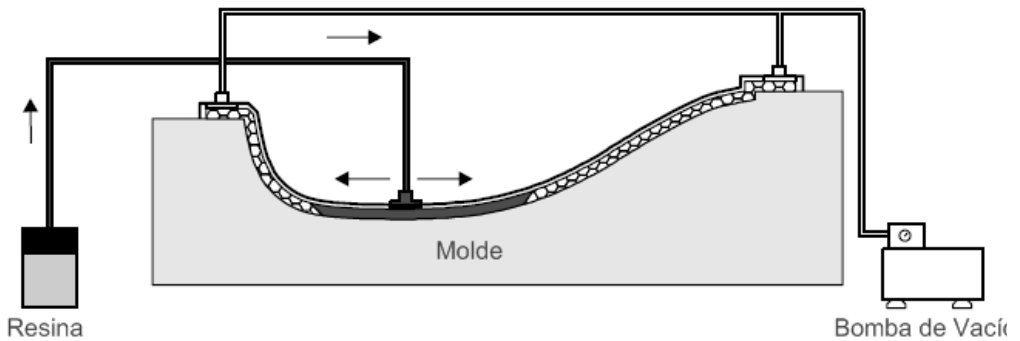
(a) Preparación de la Preforma



(b) Colocación de la Preforma



(c) Preparación de la Inyección



(d) Inyección y Polimerización



(e) Desmoldeo

Figura 16.- Proceso de Infusión

El primer paso en el proceso de fabricación de la pieza es la preparación del refuerzo como un conjunto de diferentes *mats*, tejidos y/o núcleos que posteriormente serán adaptados a la superficie del molde formando lo que se conoce como preforma. Esto conlleva el corte de una o más partes de un tejido o *mat* a partir de una bobina continua de este tipo de material. Adicionalmente, si la pieza lo requiere, será necesario cortar el núcleo de la pieza también a partir de piezas regulares de tamaño superior.

El segundo paso en el ciclo productivo es la colocación de la citada preforma sobre la superficie del molde. En esta etapa, el material que va a

formar parte del refuerzo de la pieza es colocado capa por capa intentando ajustar al máximo los radios de curvatura existentes. Esto conlleva en cierta medida la distorsión de la estructura original del tejido. Este proceso recibe el nombre de *conformado* del tejido. Es por ello que las fibras se estiran y la estructura del refuerzo se ve modificada. El conformado es importante porque pueden producirse o bien arrugas que corresponden a zonas de exceso de fibra o bien huecos allí donde el tejido haya sido estirado, lo que conlleva en ambos casos a diferencias en las propiedades mecánicas del producto final en comparación con una zona de tejido no distorsionada. Cuando se trata de un producto de grandes dimensiones, tal como una piscina o una pala de aerogenerador, la bobina de tejido se despliega directamente sobre el molde y el tejido se va conformando. Esto produce distorsiones importantes. El mismo caso se producirá en piezas de menores dimensiones en las que existan radios de curvatura importantes, ya que el conformado del tejido implicará la aparición de tensiones. En la figura 17 se muestra el conformado del tejido sobre un molde que corresponde a una sección de pala de aerogenerador.



Figura 17.- Conformado del refuerzo sobre el molde

Una vez todo el refuerzo ha sido conformado sobre la superficie del molde, comienza la fase de preparación de la inyección. En primer lugar, se coloca sobre el refuerzo una film desmoldeante que permite separar todos los materiales fungibles que se colocarán sobre el refuerzo en etapas posteriores (tubos de reparto de resina, tubos de conducción del vacío, bolsa de vacío, malla distribuidora, etc...). Para ello se puede utilizar un film plástico que se encuentre regularmente perforado o bien un *Peel ply*, que confiere a la superficie de la pieza un acabado determinado que facilita operaciones posteriores de pegado. Cuando toda la pieza ha sido cubierta con este film, comienza el posicionado de las entradas de resina y las *salidas* de vacío. Las entradas de resinas, en función del tamaño y forma de la pieza, pueden consistir bien en puntos de inyección bien en tubos perforados o espirales a lo largo de una longitud determinada de la pieza. Es posible controlar el flujo de resina instalando varios puntos de inyección de la misma y abriéndolo de forma secuencial.

Por lo que respecta al vacío, los puntos de succión se colocan donde se tenga previsto que el frente de avance de la resina llegue en último lugar, de tal forma que contribuya al gradiente de presión que hace de fuerza impulsora de la resina hasta que la cavidad se llene completamente. Finalmente, todo el conjunto se cubre con la *bolsa de vacío*, que sella la cavidad en su zona perimetral gracias a la acción de una masilla selladora o *tacky tape*. Una vez hecho esto, se conecta el vacío al conjunto. La presión atmosférica obliga a salir al aire que se encontraba en la cavidad y así la preforma se comprime.

Una vez alcanzado el nivel de vacío deseado, que se mantendrá constante durante todo el proceso, se inicia la etapa de inyección. Para ello se abre el primer punto de inyección y la resina comienza a saturar el refuerzo. A medida que el frente de avance de la resina se dirige hacia los puntos de vacío, el refuerzo se va saturando. Una vez el refuerzo ha sido completamente saturado, se cierran los puntos de inyección de resina y se espera el tiempo necesario para la polimerización de la resina. La última

fase consiste en el desmoldeo de la pieza y los trabajos de desbarbado necesarios para darle su forma final.

Los diferentes procesos dentro de la familia LCM son, en cierta medida, complementarios. El proceso RTM, debido a un mayor coste de inversión en la fabricación del molde, que a su vez depende del tamaño de la pieza, es competitivo para la realización de grandes series de piezas relativamente pequeñas ($<2\text{m}^2$) o cuando sean requisito imprescindible cuestiones tales como la tolerancia dimensional de la pieza o un buen acabado superficial en ambas caras. Sectores tales como el aeronáutico o automoción utilizan este proceso para la fabricación de algunos componentes. Si el tamaño de la pieza aumenta ($2\text{m}^2 < \text{tamaño pieza} < 10\text{m}^2$) y las tolerancias dimensionales no son tan estrictas el proceso *RTM-Light* puede ser el más competitivo entre los procesos LCM. Sin embargo, a partir de un tamaño de pieza superior a los 10m^2 , es difícil competir con la *infusión* para la fabricación de materiales compuestos. Deben, sin embargo, tenerse en cuenta factores tales como la serie o número de piezas iguales a fabricar, la tolerancia dimensional, el acabado superficial y la mano de obra requerida, para seleccionar el proceso más competitivo.

Técnicas similares a la infusión han sido objeto de desarrollo tecnológico prácticamente desde mitad del siglo XX; desde el método *Marco*¹⁴ para la fabricación de cascos de barco, hasta el método *SCRIMP*^{®15}. Williams et al. realizaron una detallada búsqueda de patentes relacionadas con el proceso de infusión¹⁶. En los últimos años han surgido diversas invenciones relativas a la mejora de los medios de distribución de resina en la preforma¹⁷, al propio sistema de inyección de resina¹⁸, a el aumento de la fracción volumétrica de refuerzo¹⁹ o incluso a la forma de detección de pérdidas de vacío en el dispositivo experimental^{20,21}.

1.4.1.- Modelización del proceso de infusión.

Durante las últimas décadas se han llevado a cabo diferentes investigaciones para predecir el llenado de moldes de RTM. Fracchia²², Brusckke²³, Trochu²⁴ mostraron los primeros trabajos para la puesta en marcha de la simulación numérica de tales procesos mediante la técnica de los volúmenes de control. Ruiz²⁵ probó estrategias tales como la aproximación por diferencias finitas y Lin^{26, 27} consideró la polimerización de la resina en el análisis.

En infusión, de forma análoga a RTM, la resina fluye gracias a la fuerza impulsora que supone la diferencia de presiones entre la entrada de resina y la cavidad del molde. Dicha fuerza impulsora produce una distribución de presiones del fluido en la cavidad - que es variable con el tiempo - o un *campo de gradientes de presión*. La inyección de dos preformas idénticas por RTM y VI, usando la misma fuerza impulsora, proporciona campos de presión distintos en la cavidad. Esto se debe al hecho de que en RTM la compactación de la preforma es constante con el tiempo, mientras que en VI varía localmente a medida que avanza la resina, lo que se debe a la flexibilidad del molde superior. La compactación de la preforma en infusión es un resultado de su propio *campo de presiones de compactación*, diferencia entre la presión atmosférica y la presión local de la resina, que varía con el tiempo y la posición en la cavidad. Esto último puede observarse en la figura 18.

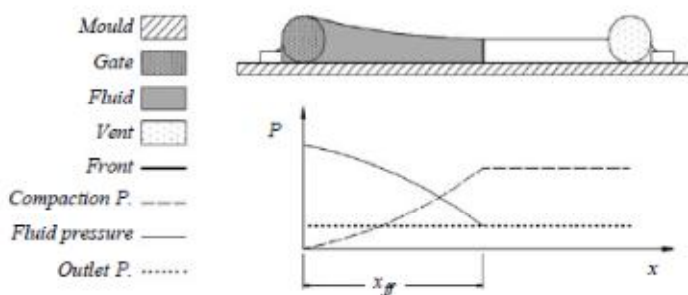


Figura 18.- Efecto de la compactación en VI

A medida que avanza el frente de flujo en la preforma, el campo de presiones de compactación disminuye, lo que resulta en un aumento del espesor de la preforma. Dicha variación del espesor aumenta la porosidad y, en último término, la porosidad del medio, concepto que se explicará en detalle posteriormente.

La base de los diferentes modelos que tratan de predecir el flujo de un fluido a través de un medio poroso es la ecuación de continuidad

$$\oint_S \rho \cdot \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{n}} - \rho \cdot \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot \phi dV = 0 \quad (1)$$

la cual relaciona la velocidad de flujo a través de los límites de un volumen de control con su velocidad de expansión/contracción y con la densidad del fluido y la porosidad del medio poroso.

Uno de los primeros autores que pusieron su atención en la compactación de las preformas de materiales compuestos fue Gutowski²⁸, aunque sus estudios se centraron en el proceso de moldeo por compresión con molde rígido. En este caso, aunque el espesor era función del tiempo, se describía de forma independiente al flujo de resina. Hammani^{29,30} modeló el flujo de resina en infusión para el caso lineal (1D). Si se reduce la preforma a un volumen de control en el que la variación de la porosidad en el mismo es despreciable (figura 19) la ecuación (1) puede escribirse como:

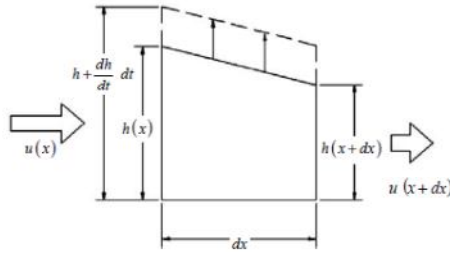


Figura 19.- Volumen de control para VI

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \int_V dV \right] + (u_0 \cdot h_0 - u_i \cdot h_i) = 0 \quad (2)$$

Integrando sobre el volumen de control y cambiando a forma diferencial

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi \cdot h \cdot \partial x] + \partial(u \cdot h) = 0 \quad (3)$$

Convirtiendo la porosidad en función de la fracción en volumen de refuerzo en el volumen de control

$$\partial x \frac{\partial}{\partial t} [(1 - v_f) \cdot h] = -\partial(u \cdot h) \quad (4)$$

Si tenemos en cuenta que $v_f \cdot h$ es constante con el tiempo, se obtiene

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial(u \cdot h)}{\partial x} \quad (5)$$

que relaciona la variación del espesor de un volumen de control con la velocidad del flujo en un proceso de infusión en una experiencia 1D.

Como se ha citado previamente, el espesor variable en infusión tiene implicaciones directas en la permeabilidad de la preforma, en la porosidad y, por lo tanto, en el flujo de resina. Asumiendo que la compactación no varía con el tiempo en un volumen de control, puede expresarse de la siguiente manera³¹:

$$P_{comp} = A_s \frac{\left(\frac{v_f}{v_{f0}} - 1\right)}{\left(\frac{1}{v_f} - \frac{1}{v_{fa}}\right)^4} \quad (6)$$

Las variables A_s , v_{f0} y v_{fa} representan una constante del refuerzo, la fracción volumétrica cuando la presión de compactación es cero y la fracción volumétrica máxima teórica, las cuales dependen todas de la arquitectura del refuerzo. P_{comp} y v_f son respectivamente la presión de compactación que es aplicada en el refuerzo y la fracción volumétrica resultante. En infusión la presión de compactación es la diferencia entre la presión del fluido en el volumen de control y la presión atmosférica. La presión en volumen de control tiende a expandirlo, mientras que la atmosférica tiende a contraerlo. También es posible encontrar relaciones empíricas^{32,33,34} que mediante una ecuación de potencia ajustan la fracción volumétrica con la presión de compactación. Asumiendo que la compactación no depende de la velocidad del fluido, este modelo toma la forma

$$v_f = v_{f0} \cdot P_{comp}^B \quad (7)$$

donde B es una constante relacionada con la rigidez de la preforma ante la compactación, que depende de la naturaleza del material y de la arquitectura de la preforma. Es necesario, por lo tanto, realizar diversas experiencias y ajustar las constantes mediante mínimos cuadrados u otro método numérico. En la práctica son comunes coeficientes de correlación superiores a 0.98 en este tipo de experiencias.

El flujo en el plano a través de un medio poroso que puede sufrir compactación en la dirección del espesor su puede expresar utilizando las ecuaciones (5) y (7). La ecuación de Darcy (que se deriva de las leyes de conservación de la masa y movimiento para el flujo de un fluido a través de un medio poroso) en una única dimensión puede escribirse como sigue.

$$u_x = -\frac{K dP}{\mu dx} \quad (8)$$

Para un flujo unidireccional combinando las ecuaciones (5) y (8) se obtiene:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial \left(-\frac{hk}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right)}{\partial x} \quad (9)$$

Los diferenciales parciales pueden expandirse a

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(K \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial K}{\partial x} \right) \frac{\partial P}{\partial x} + hK \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \right] \quad (10)$$

Dado que tanto el espesor como la permeabilidad son funciones de la presión, que a su vez depende de la posición en el molde, la ecuación (10) puede escribirse como sigue

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\left(K \frac{\partial h}{\partial P} + h \frac{\partial K}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + hK \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \right] \quad (11)$$

Correia³¹ resuelve la ecuación (11) considerando que el campo de presiones para una modelización de VI no presenta derivadas parciales del espesor y la permeabilidad con respecto de la posición. La presión permanece constante si se calcula no para un punto concreto sino para una posición relativa entre la inyección y el venteo. Puede entonces realizarse la siguiente sustitución de variables:

$$\alpha = \frac{x}{L} \quad (11)$$

donde L es la posición del frente de flujo para un instante dado. De esta manera, el frente de flujo estaría posicionado en $\alpha=1$, mientras que la inyección estaría en $\alpha=0$ independientemente del tiempo. Estableciendo unas condiciones de contorno concretas para ciertos materiales y condiciones de la experiencia y aplicando cálculo numérico se llega a las soluciones para el campo de presiones del fluido mostradas en la figura 20.

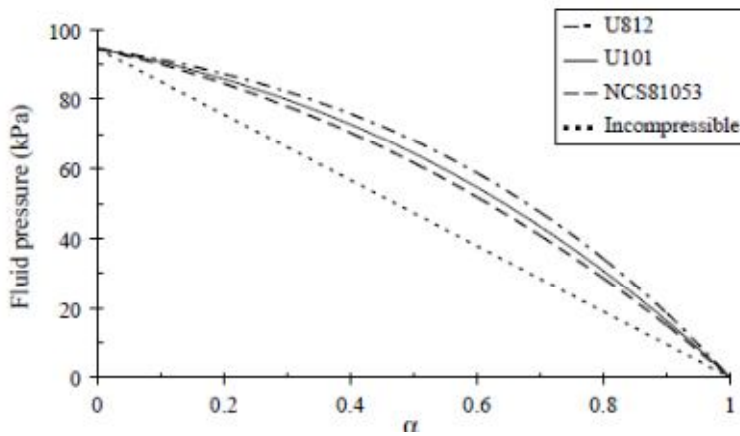


Figura 20.- Campo de presiones en VI

A diferencia de RTM, puede observarse que en VI el gradiente de presiones entre la inyección y el frente de flujo no es lineal.

En cuanto a la progresión del frente de flujo, la ecuación de continuidad impone que

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0 \quad (13)$$

por lo que el tiempo de llenado puede ser obtenido de la integración de la ecuación de Darcy, lo que resulta en

$$t_{RTM} = -\frac{\phi \mu L^2}{2K \Delta P} \quad (14)$$

Donde ϕ es la porosidad, μ la viscosidad, K la permeabilidad y ΔP el gradiente de presiones. La ecuación 14 predice que el tiempo de llenado es inversamente proporcional a la fuerza impulsora. Sin embargo, para un proceso VI el gradiente de presiones no es lineal, por lo que no puede utilizarse la ecuación (13) ni, consecuentemente, la solución de la ecuación (14) para el tiempo de llenado. Utilizando la variable adimensional $\alpha = x/L$ es posible expresar la ley de Darcy para VI como:

$$\frac{dL(t)}{dt} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{K}{\phi} \right)_{\alpha=1} \left[\left(\frac{dP}{d\alpha} \right)_{\alpha=1} \frac{1}{L(t)} \right] \quad (15)$$

donde $(\phi)_{\alpha=1}$, $(K)_{\alpha=1}$ y $\left(\frac{dP}{d\alpha} \right)_{\alpha=1}$ representan la porosidad, la permeabilidad y el gradiente de presiones en la posición del frente de flujo. Integrando se obtiene el tiempo de llenado para un proceso VI unidimensional:

$$t_{VI} = -\frac{\mu}{2} \frac{L^2}{\left(\frac{K}{\phi} \frac{dP}{d\alpha} \right)_{\alpha=1}} \quad (16)$$

Comparando las ecuaciones (14) y (16) queda de manifiesto que la permeabilidad y porosidad del refuerzo en un punto dado son a su vez función del gradiente de presión en ese punto. Es necesario por tanto conocer la variación de la permeabilidad y la porosidad con la presión para conseguir una solución analítica del tiempo de llenado para una posición dada.

1.4.2.- Simulación del proceso de infusión

El interés en la simulación numérica del flujo de líquidos en un medio poroso, como por ejemplo el llenado de un molde por una resina con una preforma porosa, ha supuesto mucho trabajo en el desarrollo de software en las últimas décadas. Así, RTM-Worx® de PolyWorx®, LIMS® (Liquid Injection Moulding Simulation) de la Universidad de Delaware y RTMFLOT® de la Escuela Politécnica de Montreal (comercializado en la actualidad por ESI-Group® con el nombre comercial de PAM-RTM®), son algunos ejemplos de software desarrollados para la simulación de los procesos LCM.

El punto de partida fue la simulación de la inyección de láminas delgadas en 2D. Frecuentemente este tipo de simulaciones toman el nombre de 2.5D debido a la deformación en el espacio de dichas láminas bidimensionales. El flujo en el espesor de este tipo de modelos no es considerado. Sin embargo recientemente, dado el auge de los procesos VARTM para la fabricación de piezas de grandes dimensiones con espesores considerables, en las que se utiliza un medio altamente permeable a la resina en la zona superior de la preforma, no puede despreciarse el flujo de resina que avanza en dirección transversal al plano o *a través del espesor*. Como se ha mostrado previamente, las ecuaciones que gobiernan el proceso están basadas en la Ley de Darcy, que se resuelve principalmente aplicando métodos de elementos finitos y volúmenes de control. Este tipo de estrategias es, básicamente, un método explícito de integración del tiempo de llenado, en el que el gradiente de presión en cada paso se usa para la evaluación del flujo. El tiempo necesario para el llenado del siguiente volumen de control, que es un *seudo-volumen* entre los elementos finitos adyacentes, es determinado y el frente de flujo avanzado. Se determina entonces el nuevo campo de presión y se repite el proceso de nuevo. La simulación termina cuando se llena toda la preforma³⁵. Los programas generalmente asumen condiciones isoterms, aunque día a día se completan con, por ejemplo, la posibilidad de incluir el efecto de la cinética de curado, transferencia de calor, posibilidad de predecir la formación de zonas secas, etc...

Existen varias referencias que reportan resultados positivos de la simulación de los procesos LCM. Hoeberg³⁶ trabajó con la estrategia de inyección de un proceso VARTM para la fabricación de un casco de barco, describiendo la pieza como una lámina delgada de 2.5D y espesor constante. El uso de un medio altamente permeable y flujo a través del espesor fue simulado por Sun³⁷ usando un software con simulación 3D. El efecto de las capas de *peel-ply* se investigó en una preforma que consistía en tres capas de mat y un medio de distribución separados por dichas capas. El *peel-ply* es un tejido que, colocado en la parte superior del laminado, ofrece cierto acabado superficial a la pieza y permite la separación de los elementos fungibles tras el proceso de polimerización de la pieza inyectada. Tari³⁸ usó un software de simulación 2D para simular el flujo transversal en un dispositivo experimental que incluía una capa de alta permeabilidad. Se obtuvo un retraso entre la capa superficial y la base de la preforma constante. Kang³⁹ simuló en 2D con éxito el flujo de una preforma compleja con múltiples puntos de inyección. Los resultados experimentales confirmaron la simulación. Bickerton⁴⁰ modeló el efecto de *race tracking* (aumento de porosidad en los límites de la preforma debido a la discontinuidad con la cavidad). A menudo dicho canal mejora el flujo de resina en la cavidad, pero en otras ocasiones se debe a una incorrecta colocación de la preforma, lo que resulta en un perfil de flujo indeseado que puede llevar a la formación de zonas secas, debido a que la resina alcanza los venteos antes de impregnar completamente la preforma. Se siguieron dos aproximaciones: en primer lugar se modelizó el canal de *race tracking* calculando su permeabilidad equivalente. En segundo lugar, el flujo a través del canal se modelizó usando un flujo de Stokes 1D. Se utilizó la Ley de Darcy para modelizar el flujo en la preforma y se obtuvieron buenas correlaciones. La permeabilidad equivalente también fue sugerida por Hammani⁴¹ para simular el flujo de resina en el canal de *race tracking*.

Bickerton⁴² simuló el proceso RTM tratando de correlacionar la variación en la permeabilidad debido a la deformación de la preforma por la curvatura del molde. Se realizó midiendo el espesor real y estimando con el

resultado la porosidad y permeabilidad obtenida experimentalmente. El cambio en la permeabilidad de la preforma debido a su deformación también ha sido investigado por Han⁴³, quien extendió el uso de modelos 2D para conseguir simulaciones más precisas de procesos VARTM incluyendo los cambios en el espesor y el flujo a través del espesor. La relación entre la presión y el espesor se obtiene experimentalmente y se utiliza la ecuación de Karman-Kozeny para relacionar la permeabilidad con la porosidad. Por lo tanto, porosidad y permeabilidad son constantemente actualizadas durante la simulación. Otra modificación es introducir volúmenes de control tridimensionales en los canales de inyección de resina, mientras que se utiliza un modelo 2D en el resto de la preforma. Se probaron experimentalmente diferentes estrategias de inyección y se compararon con las simulaciones, obteniendo buenos resultados.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo de resina en procesos VARTM han sido tratadas en diversas investigaciones. Correia³¹ realizó una recopilación y unificó los modelos demostrando que las desviaciones se debían a diferentes suposiciones. También se compara en detalle los procesos RTM y VARTM llegando a la conclusión de que es posible obtener una permeabilidad equivalente que incluya el fenómeno de la variación en el espesor y porosidad de la preforma en procesos 1D. Por otro lado, Trochu⁴⁴ enfoca la simulación del proceso VARTM a través de las ecuaciones de consolidación, desarrollando el modelo de deformación de la preforma, lo que permite estimar las variaciones en el espesor. Además, propone técnicas de remallado para simplificar el proceso y realiza diversas experiencias que correlaciona con los resultados obtenidos.

1.4.3.- Permeabilidad

La Ley de Darcy⁴⁵ ha sido utilizada tradicionalmente para describir el flujo de un fluido en el interior de un medio poroso. Investigaciones recientes han empleado dicha ley para describir el flujo de la resina en el interior de la preforma de refuerzo en la tecnología de materiales compuestos^{46,47}. La forma generalizada de la Ley de Darcy se muestra en la ecuación 5.1. Para

describir el flujo de resina en el interior del refuerzo relaciona la velocidad media v_f con el gradiente de presión (ΔP), la permeabilidad del refuerzo (K) y la viscosidad de la resina (μ).

$$\mathbf{v} = -\frac{K}{\mu} \nabla p \quad (17)$$

La permeabilidad mide la facilidad que un refuerzo ofrece al flujo de resina en su interior. Nótese que dicho parámetro es claramente anisótropo, es decir, el refuerzo no ofrece la misma resistencia al flujo de resina en una dirección que en otra distinta. Supongamos un refuerzo situado en la cavidad de un molde justo en la zona donde va a entrar la resina desde el exterior. En función del tipo de tejido y de la disposición de sus hilos, la resina encontrará una resistencia distinta para avanzar en las tres direcciones del espacio. Por ello, la permeabilidad en la ecuación (17) es un tensor de segundo orden. La ecuación (17) queda en su forma expandida para las tres dimensiones del espacio de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Para un material permeable isótropo (como una hipotética nube de puntos equiespaciados) la permeabilidad tomaría la forma de un escalar K . En este hipotético caso, el refuerzo ofrecería la misma resistencia al flujo de la resina en todas las direcciones del plano y en cualquier sentido. Sin embargo, para cualquier refuerzo empleado en la tecnología de materiales compuestos, la permeabilidad \mathbf{K} toma la forma de un tensor de segundo

orden. Asumimos que dicho tensor es simétrico ya que la permeabilidad es función de la dirección en la que avanza la resina pero no del sentido de avance. Además, existe una combinación de tres direcciones ortogonales en las que el tensor de permeabilidad puede ser completamente definido sólo con tres elementos. Dichos elementos son lo que conocemos como *direcciones principales de permeabilidad* K_1 , K_2 y K_3 . De esta manera, la permeabilidad de un tejido en sus direcciones arbitrarias puede expresarse como:

$$\mathbf{K}_a = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Y en sus direcciones principales como

$$\mathbf{K}_p = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

La figura 21 muestra la interpretación gráfica del tensor de permeabilidad arbitrario y principal:

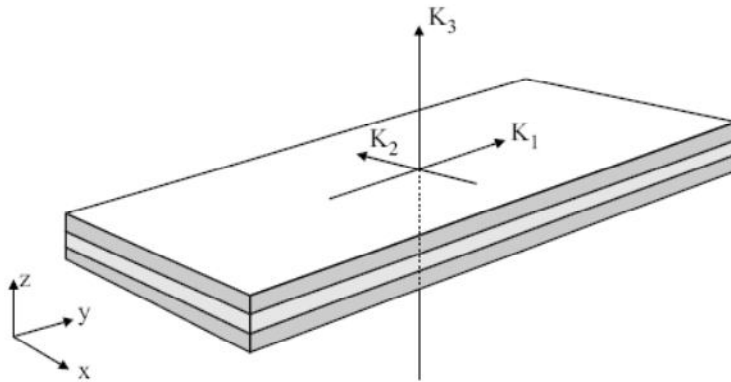


Figura 21.- Direcciones principales de permeabilidad de un refuerzo

En su forma elíptica, la dirección en la que el frente de flujo avanza en el plano a mayor velocidad (mayor permeabilidad) K_1 es normal a la dirección de avance más lenta K_2 . La permeabilidad *a través del espesor* K_3 es perpendicular tanto a K_1 como a K_2 .

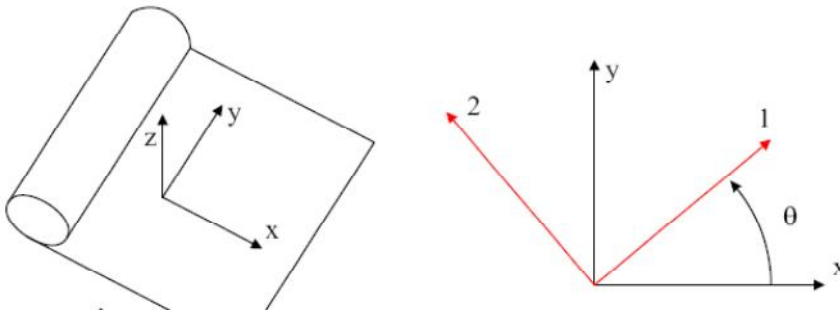


Figura 22.- Equivalencia entre direcciones principales y arbitrarias

Como ha sido descrito con anterioridad, el refuerzo suele suministrarse en forma de bobinas. La dirección en la que se despliega la bobina es la urdimbre, mientras que su dirección perpendicular es la trama. Como se muestra en la figura 22, las permeabilidades arbitrarias K_x y K_y se

corresponden respectivamente con la permeabilidad en la dirección de la urdimbre y la trama respectivamente.

El ángulo θ es característico de cada refuerzo y se corresponde con la diferencia en la dirección de la urdimbre y la permeabilidad principal K_1 .

Como se describirá posteriormente, el empleo de las equivalencias anteriores permite determinar las permeabilidades principales a partir de las permeabilidades arbitrarias y el ángulo θ a través de simples relaciones geométricas

La permeabilidad de tejidos textiles se determina normalmente por homogeneización de las propiedades de los haces de fibras y los huecos entre los haces de fibras que los componen, los cuales forman una red de poros con una escala, en realidad, dual. Existe un flujo de resina entre las fibras de un mismo haz de fibras (microporos) y un flujo entre los haces de fibras (macroporos). Puede observarse un esquema de ambos flujos en la figura 23.

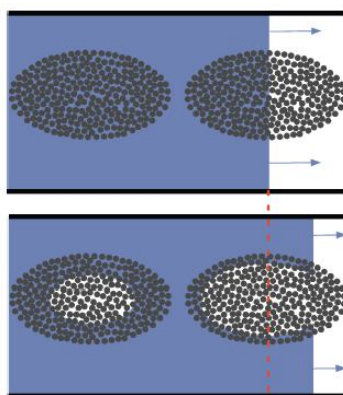


Figura 23.- Flujo de resina a través de los macro y micro poros. Escala dual de la permeabilidad.

Dado que la orientación en el espacio de las direcciones principales del flujo queda determinada por la orientación de los poros (o lo que es lo mismo, la orientación de las fibras), para tejidos delgados bidimensionales,

las dos primeras direcciones principales deben quedar en el plano del tejido, mientras que la tercera dirección principal será perpendicular al plano. Sin embargo, se puede argumentar que este no es el caso general para refuerzos fibrosos⁴⁸. Se han publicado trabajos significativos en la modelización de la permeabilidad de tejidos con arquitecturas específicas, en particular tratando el problema de la dualidad de escala en la porosidad^{49,50,51}. Un problema general es que es difícil describir con precisión la estructura de los canales entre las fibras de un mismo haz y entre haces adyacentes, lo que obliga a llevar a cabo una determinación experimental de la permeabilidad para obtener resultados satisfactorios. Una alternativa es la utilización de complejos cálculos numéricos⁵² aunque igualmente requieren datos obtenidos de forma experimental sobre la arquitectura de los poros en la preforma.

La caracterización de la permeabilidad ha suscitado interés en otras tecnologías relacionadas con la tecnología textil. De hecho, se han publicado diferentes normas para la caracterización de la permeabilidad a través del espesor para ropa y textiles técnicos (ASTM D737: flujo de aire, ISO 15496: flujo de vapor de agua) y para geotextiles (ASTM D5493: flujo de agua). Para caracterizar el flujo de resina en preformas textiles se han desarrollado un buen número de métodos⁵³. La mayor parte de los mismos miden la permeabilidad en el plano, lo cual es de gran relevancia para los procesos LCM, puesto que la mayoría de las veces pueden ser modelizados por láminas de pequeño espesor. Sin embargo, existe una gran carencia de estandarización y es bien conocido que la determinación de la permeabilidad realizada por métodos distintos no es necesariamente consistente. En 1995, Parnas⁵⁴ propuso el uso de un tejido de referencia para la estandarización de los métodos de medida de permeabilidad, pero hasta la fecha no existen normas o guías de uso común. Lundström⁵⁵ reportó un estudio de *benchmarking* a pequeña escala, en el que se trataron temas de reproducibilidad de diferentes métodos de caracterización de permeabilidad en refuerzos. Para un material de referencia, la variabilidad de resultados obtenidos por diversos

laboratorios estaba en el mismo orden de magnitud que la propia incertidumbre experimental. Sin embargo, en el estudio participaron sólo tres laboratorios que usaban el mismo dispositivo experimental y cuyos técnicos de laboratorio fueron específicamente formados para el ejercicio. De esta manera, la variabilidad observada se atribuyó a la forma de preparación de la muestra. Edu Ruiz⁵⁶ mostró los resultados parciales de otro ejercicio de *benchmarking* actualmente en proceso en el que un buen número de laboratorios con experiencia en la caracterización de la permeabilidad participaron. Los resultados de la permeabilidad en el plano, para dos tejidos distintos (fibra de vidrio y carbono) suministrados a todos los laboratorios por el mismo fabricante, caracterizados por los métodos propios de cada laboratorio (16 en total), son consistentes si se realizan con el mismo método aún en laboratorios distintos. Sin embargo, la conclusión principal del ejercicio es que, para cada tejido, los resultados proporcionados por diferentes participantes para los valores de permeabilidad a cualquier fracción volumétrica de refuerzo muestran variabilidades de hasta dos órdenes de magnitud. El cociente entre los valores de permeabilidad principales, que marcan la forma del frente de flujo en el llenado en la simulación de los procesos LCM y, por lo tanto tiene gran importancia para la optimización del diseño del molde, varía por factores de hasta 2.

Medida de la permeabilidad

Se han desarrollado varios métodos para la determinación experimental de la permeabilidad de un refuerzo en forma de tela o tejido. Se pueden clasificar atendiendo a los siguientes criterios principales:

- Geometría del flujo (lineal o radial, descritos en detalle posteriormente)
- Forma de inyección del fluido (a presión constante o a caudal constante)
- Saturación de la muestra (saturada o no saturada)

Si bien puede encontrarse un resumen completo de los métodos existentes en la actualidad en un trabajo de Sharma⁵⁷, los principios básicos de los métodos más empleados son como sigue.

Para flujo lineal insaturado a presión de inyección constante, la permeabilidad se determina con experiencias de inyección en una preforma rectangular con un punto de inyección rectangular, para que el fluido utilizado impregne todas las capas de refuerzo y toda su amplitud al mismo tiempo. Se asume que el frente de flujo es recto y perpendicular al eje longitudinal de la preforma rectangular. La integración de la ecuación de Darcy para un tiempo dado da la permeabilidad en la dirección longitudinal.

$$K = -\frac{x_{ff}^2 \phi \mu}{2\Delta p t_{ff}} \quad (21)$$

donde x_{ff} es la posición del frente de flujo para un tiempo desde el inicio de la inyección t_{ff} , Δp es la diferencia entre la presión de inyección y la presión del frente de flujo, μ es la viscosidad del fluido inyectado y ϕ es la porosidad del refuerzo en la cámara de inyección. La inclusión de la porosidad responde a la diferencia entre la velocidad del frente de flujo en condiciones de saturación de la preforma, que corresponde a la velocidad media de las moléculas de fluido a lo largo de todo el gradiente de presión, y la velocidad definida en la Ley de Darcy - o velocidad de Darcy - que es un promedio entre la velocidad del fluido y la del lecho poroso. La porosidad de la preforma se relaciona con la fracción volumétrica de refuerzo según

$$\phi = 1 - V_f. \quad (22)$$

En la práctica, V_f se puede determinar de la siguiente manera

$$V_f = \frac{nS_0}{\rho_f h'} \quad (23)$$

donde n es el número de capas de refuerzo en la muestra, S_0 es la densidad superficial o gramaje del tejido, ρ_f es la densidad del material del tejido y h' es la altura de la cavidad. La posición del frente de flujo en función del tiempo de inyección $x_{ff}(t_{ff})$ es usualmente determinada por inspección visual del ensayo a través del contramolde superior transparente de la cavidad donde transcurre la inyección^{58,59}. Existen técnicas alternativas para la detección del frente de flujo basadas en sensores de fibra óptica⁶⁰, termistores⁶¹, transductores de presión⁶² o medidas de ultrasonidos y resistencia eléctrica⁶³. Ferland⁶⁴ describió diversos métodos concurrentes para el tratamiento de los pares de valores $x_{ff}(t_{ff})$ en la obtención de la permeabilidad de la preforma. En este trabajo se utilizarán dichos esquemas en la caracterización de la permeabilidad.

Para flujo lineal saturado, la Ley de Darcy puede resolverse directamente para la permeabilidad

$$K = -\frac{Q\mu L}{A\Delta p} \quad (24)$$

donde Q es la velocidad del fluido, A es la sección del canal por donde discurre el fluido y L es la longitud de la probeta. En el caso de inyección a presión constante, la velocidad del fluido se puede determinar a partir del caudal másico, determinado por pesada a la salida de la cavidad en un determinado tiempo de inyección, y la densidad del fluido⁶⁵. Para el caso de caudal constante, se determina la pérdida de presión a través de la longitud de la preforma, que es constante (no lo es para VARTM, como ha sido indicado previamente). Los dispositivos de este tipo permiten el cálculo de la permeabilidad *en el plano y a través del espesor*.

El avance del flujo radial en medios porosos de poco espesor ha sido muy discutido en la literatura, principalmente por Adams y Rebenfeld^{66,67}. El flujo radial en preformas no saturadas es gobernado por la ecuación de Laplace, la cual se deriva de la combinación de las ecuaciones de Darcy con la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles. La solución para presión de inyección constante da

$$K = \frac{\phi\mu R_0^2}{4\Delta p t_{ff}} \left(\left(\frac{R_{ff}}{R_0} \right)^2 \left(2\ln \left(\frac{R_{ff}}{R_0} \right) - 1 \right) + 1 \right) \quad (25)$$

donde R_{ff} es el radio del flujo circular a tiempo t_{ff} y R_0 es el radio del punto de inyección circular. El caso general de tejidos anisótropos con flujo en forma de elipse es más complejo. La formulación del problema en coordenadas elípticas⁶⁸ permite una solución similar a la (25) que se deriva para obtener una permeabilidad isotrópica equivalente. La determinación de los valores de permeabilidad principal K_1 y K_2 a partir de la permeabilidad isotrópica equivalente se basa en la medida de los radios R_1 y R_2 en el frente de flujo de la elipse para un tiempo dado. Weitzenböck^{69,70} extendió el método para determinar la permeabilidad sin conocer previamente las direcciones principales.

Los ensayos de flujo radial con caudal constante^{71,72} permiten la medida de permeabilidad con un gradiente de presión constante. Para flujo saturado en un tejido isótropo, la permeabilidad puede obtenerse de

$$K = \frac{Q\mu}{2\pi h\Delta p} \ln\left(\frac{R_{ff}}{R_0}\right) \quad (26)$$

Basado en el mismo concepto, Han⁷³ presentó un método para la caracterización de tejidos anisótropos en el que el gradiente de presión se mide en distintas direcciones.

Según Ruiz⁵⁶, es debatible qué método presenta mejores resultados. La comparación de métodos experimentales para la determinación de los valores de permeabilidad principal en el plano, basados en seguimiento visual del frente de flujo, en dispositivos lineales, con obtención separada de los valores K_1 y K_2 , presenta la reproducibilidad más alta^{55,74,75}. Sin embargo, los dispositivos con flujo lineal son inherentemente susceptibles de error si las direcciones de permeabilidad principales no coinciden con el eje longitudinal del flujo del fluido en el dispositivo experimental, debido a que aparece un flujo en dirección transversal que anula la propia asunción de flujo lineal. Este efecto es más acusado cuando la dirección principal de permeabilidad se acerca a los 45° con respecto a la ensayada, se tiene pequeñas relaciones de aspecto entre la longitud de la preforma y su anchura y alta anisotropía. A esto hay que añadir que los dispositivos lineales sufren cierto problema inevitable de *racetracking*, debido a los huecos entre la preforma y los bordes de la cavidad, que pueden hacer circular más rápido el fluido y llevar a valores sobreestimados de permeabilidad.

Los valores de permeabilidad obtenidos en dispositivos saturados e insaturados pueden diferir debido al efecto de la capilaridad en flujos

insaturados⁷⁶. La impregnación de fibras secas en flujo insaturado está afectada por la presión capilar, la cual viene dada por la tensión superficial del fluido, el ángulo de contacto en la interfase fibra – fluido, que es afectada por el tratamiento superficial de las fibras⁷⁷ y el radio de las fibras⁷⁸. Esto resulta en una diferencia entre el gradiente de presión aplicado y el gradiente de presión realmente efectivo.

El método lineal de medida de permeabilidad

El método lineal de determinación de la permeabilidad de un refuerzo está basado en una preforma rectangular, donde la resina es inyectada por un extremo de la preforma y se observa el avance del frente de flujo hacia el otro extremo. El dispositivo experimental se muestra en la figura 24.

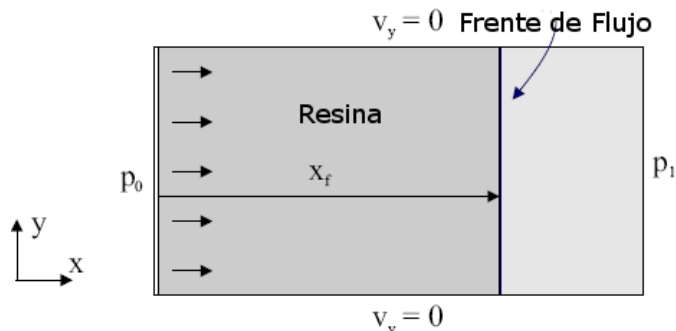


Figura 24.- Método lineal para la determinación de la permeabilidad

Como se ha descrito previamente, si la inyección se realiza a presión constante la relación entre el tiempo de inyección y la posición del frente de flujo queda

$$K = -\frac{x_{ff}^2 \phi \mu}{2\Delta p t_{ff}} \quad (21)$$

Conocida la viscosidad de la resina μ y la porosidad del refuerzo ϕ , puede realizarse un experimento en el que se tomen distintos valores de tiempo transcurrido t_{ff} , posición del frente de flujo x_{ff} y diferencia de presión Δp durante el experimento. Una vez terminado el mismo, las series de valores obtenidas pueden correlacionarse para obtener un valor de permeabilidad del refuerzo. Existen diversas formas de correlacionar los datos obtenidos; como se detallará posteriormente. En el presente trabajo se ha empleado el método de Ferland⁶⁴ para la obtención de los valores de permeabilidad a partir del método unidireccional.

En los procesos de transferencia de resina sin presencia de vacío, la porosidad del refuerzo es constante, puesto que el volumen correspondiente a la cavidad del molde no varía durante la inyección. Esto se debe a que tanto molde como contramolde son rígidos. De esta manera, todas las condiciones impuestas para el desarrollo de la ecuación (21) se cumplen y el valor de permeabilidad puede ser empleado sin mayor consideración para la modelización del llenado del molde.

El dispositivo experimental cuenta en este caso con un molde lineal rígido, típico de RTM, en el que la cavidad se encuentra calibrada con los separadores correspondientes. Conocido el volumen disponible para el refuerzo, su peso total y densidad, la determinación de la porosidad es directa.

Ahora bien, en los procesos VARTM el contramolde es una piel flexible. En este caso, el volumen correspondiente a la cavidad varía irremediablemente a lo largo del proceso de inyección de la resina al variar el gradiente de presión entre el interior y el exterior del molde. En este caso, la porosidad varía con el campo de presiones por efecto de la

compactación, por lo que es función del tiempo transcurrido en la inyección y no puede aplicarse la ecuación (21) para la determinación de la permeabilidad del refuerzo.

Koefoed⁷⁹ estudió la variación de la permeabilidad en los procesos VARTM mediante una serie de experimentos. En uno de ellos se apilaron seis capas de mat de hilos continuos de 450 g/m² en el interior de un dispositivo preparado para realizar una infusión. Se colocaron dos micrómetros en dos puntos fijos (a 35 cm y 100 cm de la inyección, respectivamente) y se registró el avance del frente de flujo y el espesor del refuerzo en dichos puntos. La posición del frente de flujo con el tiempo se muestra en la figura 25. La tendencia de la curva resultante se ajusta a lo establecido previamente por Correia (figura 18).

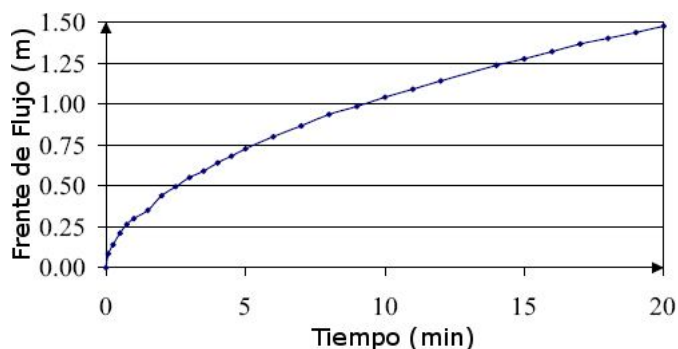


Figura 25.- Posición del frente de flujo con el tiempo

De la curva se observa que el frente de flujo alcanza el primer micrómetro después de, aproximadamente, 1.5 minutos y el segundo micrómetro tras 9 minutos de experimento. El tejido se satura completamente tras 20 minutos de experimento, momento en el que se reduce el nivel de vacío. Tras 32 minutos se cierra la inyección de resina y se deja polimerizar la resina. La porosidad medida en ambos puntos durante los 40 primeros minutos de experimento se muestra en la figura 26.

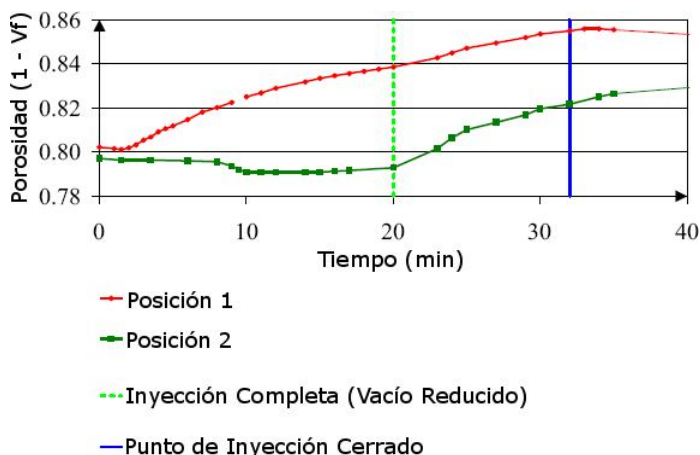


Figura 26.- Porosidad durante la inyección

Como se observa en la figura 26, la porosidad permanece constante hasta que el frente de flujo alcanza el micrómetro ya que el espesor ha sido estabilizado antes de comenzar el experimento. Una vez el frente de flujo alcanza el punto, la porosidad disminuye durante un corto periodo de tiempo para aumentar después. El cambio en la porosidad es mayor en el punto de medida más cercano a la inyección donde la porosidad aumenta desde 0.80 hasta 0.85 medido al final de la inyección. La evolución en el punto 2 es similar, sin embargo la porosidad final alcanzada en el segundo punto es menor (0.83) debido a la distribución de la presión típica del experimento lineal (figura 18). Esto significa que la presión de compresión (diferencia entre el interior y exterior de la cavidad) en el segundo punto de medida de la porosidad es superior a la del punto 1.

De esta manera, para lograr una solución analítica o numérica de los procesos VARTM deberían determinarse los valores del tensor de permeabilidad para diferentes porosidades; además, debería conocerse la variación de la porosidad en toda la cavidad y para todo el desarrollo de la inyección con el campo de presiones de compactación. Sólo de esta manera podría realizarse una modelización estricta de los procesos de

transferencia de resina con vacío. Un ejemplo de este tipo de estrategia, en el que básicamente se usa un solver de RTM (LIMS) y se modifica la permeabilidad en función de la porosidad y ésta en función de la presión de compactación para alcanzar una solución numérica puede encontrarse en un trabajo de Correia⁸⁰

1.5.- Sensorización y control de los procesos LCM. Reducción de la variabilidad inherente al proceso mediante la automatización

La simulación de los procesos LCM permite optimizar la calidad final de la pieza, reducir los tiempos de ciclo y aumentar la competitividad de los productos fabricados. Sin embargo, pese a que es posible resolver numéricamente las ecuaciones que gobiernan los procesos, existen todavía ciertas fuentes de variabilidad que hacen diferir los resultados de la simulación con el desarrollo del proceso en planta. Las principales son las siguientes:

1. Se han utilizado diversos métodos para la caracterización de la permeabilidad de los refuerzos⁵⁶, no existiendo necesariamente consistencia entre ellos, por lo que la propia determinación de la permeabilidad, independientemente del método empleado, es una fuente de variabilidad.
2. El propio proceso de preparación de la preforma y la colocación de la misma en la cavidad del molde, debido a la alta intervención de personal que es todavía necesaria, se convierte en una fuente de variabilidad debido a la presencia de canales de alta permeabilidad, deformación puntual de la preforma, etc...
3. Existen elementos adicionales presentes en el laminado, tales como núcleos (con canales y perforaciones para la modificación del flujo de resina) y postizos que añaden complejidad y variabilidad a los resultados obtenidos.

Dado que, por lo anterior, sería razonable esperar diferencias entre la forma del frente de flujo y los tiempos de llenado obtenidos mediante simulación y la inyección en el dispositivo de fabricación, es conveniente analizar si es posible conocer el tiempo real cómo avanza la inyección y si es posible modificarla para impregnar completamente el refuerzo en el

tiempo necesario para mantener la competitividad de la pieza frente a otros procesos.

Existen dos parámetros de proceso que pueden dar la información necesaria para optimizar el proceso en planta:

1. La posición del frente de flujo. Conocer el avance de resina en tiempo real permite tomar decisiones de control que aseguren la completa impregnación de la preforma.
2. El grado de curado de la resina. Una vez completada la inyección, conocer el grado de avance de la reacción permite realizar el desmoldeo en el tiempo óptimo, así como modificar el sistema catalítico en fabricaciones posteriores. Así se asegura que la viscosidad de la resina aumenta por el avance de reacción justo cuando se ha impregnado el refuerzo, lo que equivale a disponer de un tiempo de ciclo óptimo.

De hecho, en las piezas producidas mediante procesos de transferencia de resina, la transferencia efectiva de cargas desde la matriz polimérica hasta las fibras que constituyen el refuerzo depende de la completa saturación en resina del refuerzo, así como del completo curado de la misma, además del nivel de adhesión fibra – matriz^{81,82}. Los problemas derivados de la aparición de estas zonas secas comprometen seriamente la calidad e integridad estructural de los productos terminados. A menudo podemos encontrarlos en forma de burbujas entre las mechas o incluso entre los filamentos de las mismas, o también como grandes áreas en las que la resina no ha impregnado el refuerzo durante el llenado de la cavidad del molde⁸³. Esto último se ha estudiado en no-tejidos⁸⁴, tejidos unidireccionales⁸⁵ y en combinaciones de tejidos cosidos⁸⁶. Básicamente, esas son las consecuencias del *efecto borde* y, en general, de los cambios no previstos en el frente de flujo, que además pueden ser causados por multitud de factores en el proceso de llenado, tales como la técnica utilizada para conformar la preforma⁸⁷, la posición de los venteos y puntos

de inyección⁸⁸ y la naturaleza dual del flujo de resina a través y por fuera de los haces de fibras⁸⁹.

1.5.1.- Sensores Disponibles para la Determinación de la Posición de la Resina (flujo) y el Grado de Curado

La monitorización *in-situ* del curado de una pieza en los procesos LCM supone el factor clave para mejorar la calidad y la fiabilidad de los procesos LCM. Esto podría abrir la posibilidad de implementar un control *on-line* en el proceso, cambiando así los procesos tradicionales hacia otros más automatizados. De esta manera, se hace evidente la necesidad de disponer de sensores válidos para informar en tiempo real al sistema de control, de tal forma que pueda tomar las acciones correctoras adecuadas. En esta línea se han usado dispositivos **ultrasónicos** embebidos en la preforma para conocer el estado del curado de la pieza en todo momento⁹⁰ (se basan en el hecho que las propiedades de la radiación ultrasónica aplicada varía con el grado de curado de la resina)⁹¹. Sus desventajas radican en la complejidad del equipamiento necesario, así como la baja relación señal-ruido y la gran dependencia de la temperatura. También es posible encontrar sensores **piezoeléctricos** que utilizan su habilidad para convertir energía mecánica en energía eléctrica (su frecuencia resonante varía con la viscosidad y densidad del material en contacto). La desventaja principal radica en que estos sensores a veces pierden la precisión e incluso la sensibilidad en materiales de alto módulo, ya que el sensor es bloqueado físicamente por el material que lo rodea. Alternativamente puede usarse la medida de la **constante dieléctrica** del material, ya que es función del grado de curado del mismo^{92,93}. Como inconvenientes de esta técnica cabe citar el alto coste de los equipos y la necesidad de embeber los sensores en la pieza final.

Sensores del Grado de Curado de la Resina

Termopares

Cuando la resina que impregna el refuerzo fibroso comienza su reacción de polimerización, la energía calorífica provocada por la exotermia de la reacción es transferida, mediante un mecanismo de conducción, desde el interior del molde hacia el exterior del mismo. Dado que en la mayoría de los casos no es posible –ni deseado– desde el punto de vista de la cinética de la reacción- evacuar todo el calor generado, se produce un incremento de la temperatura tanto del material alojado en el interior del molde como del propio molde. Dicho aumento en la temperatura del molde se encuentra directamente relacionado con el grado de avance de la reacción y ofrece información muy útil para el control de este tipo de procesos.

No obstante, la relación existente entre el grado de avance de la reacción y la temperatura alcanzada en un punto determinado del molde depende de una serie de factores tales como el material y dimensiones del molde y de la pieza, la temperatura de la resina y la temperatura ambiente. De esta manera, el aumento de temperatura es una consecuencia de la acumulación del calor generado por la reacción química y no por la reacción química en sí. De hecho, una vez transcurrido el tiempo necesario para la evacuación del calor de reacción, la temperatura de la pieza vuelve a ser la misma que antes del inicio de la reacción.

En la figura 27 puede observarse la evolución de la temperatura con el tiempo en una simulación de un proceso típico de LCM. En dicha simulación se han situado tres termopares en diferentes alturas del espesor de la pieza. Un termopar está colocado en el centro de la pieza, otro se encuentra justo a la mitad de la distancia entre el centro y la superficie, y el último termopar se encuentra en la superficie de la pieza. En esta simulación se ha elevado la temperatura del molde a 60°C para activar la reacción. Si se observa la evolución de la temperatura en los otros dos puntos monitorizados, la propia exotermia de la reacción de

polimerización se encarga de aumentar la temperatura hasta niveles muy superiores a los de la propia pared del molde. La magnitud del pico exotérmico, como puede observarse en dicha figura 27 depende no sólo de la resina y el sistema catalítico empleado, sino que además es función de la capacidad del sistema para evacuar el calor generado durante la reacción.

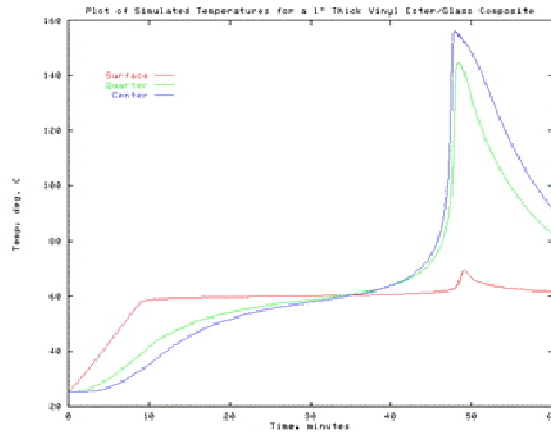


Figura 27.- Evolución de la temperatura en un proceso LCM

De la figura 27 se puede extraer con relativa facilidad el momento de máxima actividad química de la resina, que corresponde con la máxima temperatura registrada. El pico exotérmico observado no se corresponde con el fin de la reacción, sino con el punto donde la velocidad de reacción es máxima.

En resumen, la monitorización de la temperatura en función del tiempo no ofrece los dos datos principales para un óptimo control del proceso: (1) el inicio y (2) el final de la reacción, dado que existe cierto retraso de transporte entre la generación del calor y el aumento de la temperatura. Dicho aumento de temperatura, es en magnitud y duración fuertemente dependiente de otros parámetros del proceso.

Sensores basados en Fibra Óptica

Los sensores de fibra óptica⁹⁴ pueden estar basados en la absorción, reflexión, refracción o emisión de luz. Este tipo de sensores ofrece las siguientes ventajas con respecto a otros sensores tradicionales: aumento de sensibilidad, reducido tamaño y dimensiones, reducido contacto con la pieza producida e inmunidad a las radiaciones electromagnéticas. Este tipo de sensores, al estar basado en diferentes propiedades de luz, comúnmente se encuentran asociados a diversas técnicas, entre las que podemos destacar las siguientes:

La **espectroscopía infrarroja (IR)** es un tipo de técnica óptica que detecta las bandas de absorción infrarroja del material analizado. Cuando este material es sometido a un proceso de polimerización, sus grupos funcionales van cambiando de naturaleza y concentración con el tiempo, con lo que este tipo de técnica nos permite determinar el grado de avance de la reacción de curado. El uso de un espectrómetro infrarrojo ofrece una buena precisión y una rápida adquisición del espectro. Esta técnica requiere el empleo de una fuente de luz en la que puede seleccionarse la longitud de onda, con lo que la complejidad técnica y costos se ven incrementados, lo que supone su principal desventaja. Además, todos aquellos procesos que no supongan una reacción química, tales como el cambio de viscosidad no pueden ser directamente detectados por esta técnica.

El **Sensor de Onda Evanescente** también está basado en la espectroscopía infrarroja, ya que mide la luz absorbida por el polímero/fibra por el fenómeno de evanescencia durante el proceso de curado^{95,96}. La absorción evanescente de onda depende de la composición química del polímero, así como de la longitud de onda de la luz incidente usada para medir la potencia de la luz transmitida por la fibra óptica. Sin embargo, este tipo de técnica necesita de sensores de alta longitud (unos 20 cm)⁹⁷, un alto índice de refracción de la fibra y tiene una baja sensibilidad.

Otro interesante desarrollo dentro de los sensores de onda evanescente es la observación que la longitud de onda y eficiencia de la **fluorescencia** de ciertas moléculas ofrecen una dependencia de la viscosidad⁹⁸; otras resinas pueden ser dopadas con grupos fluorescentes^{99,100}, permitiendo medidas de la viscosidad de la resina usando técnicas de fibra óptica. Las principales desventajas de esta técnica son: el alto coste de los equipos de fluoroscopia y las incertidumbres causadas por fenómenos tipo *quenching*. Por todo ello, las técnicas basadas en espectroscopia no pueden ser incorporadas en los procesos industriales de fabricación de materiales compuestos para la sensorización de los procesos de curado de resinas.

Durante los últimos años, el gran interés en la obtención de sensores de bajo coste para medir el curado de resinas sugiere el empleo de una nueva técnica basada en la medida del **índice de refracción**^{101,102,103}. La variación de dicho índice puede ser relacionada con los cambios en la estructura química del polímero. Los sensores basados en la monitorización del índice de refracción necesitan que la fuente emisora de luz sea capaz de dar una luz monocromática (en frente de un amplio espectro de luces monocromáticas que requerían las técnicas anteriores); por lo tanto, el coste del equipo es sensiblemente inferior en este caso. Además, esta técnica puede ser independiente de la longitud de onda utilizada. Por ejemplo, Afromowitz^{104,105,106} propuso un sensor de curado en forma de fibra realizado íntegramente con resina curada. El principio de funcionamiento es el siguiente: cada cabo de este sensor en forma de fibra es unido a una fibra óptica convencional (silicio), lo que convierte al conjunto en un sensor de fibra óptica, de tal manera que la luz puede atravesarlo. El cambio en el índice de refracción de la resina que rodea la fibra es una medida directa del grado de avance de la reacción de polimerización. Cuando la reacción de polimerización llega a su fin, el efecto de guiado de ondas que suponía la fibra de resina curada desaparece, siendo señal inequívoca del fin de la reacción.

Sensores Dieléctricos

Mediante este tipo de sensores¹⁰⁷, que quedan embebidos en la matriz polimérica, y con el equipo adecuado, pueden tomarse medidas simultáneas de conductividad y capacitancia de la resina. Una vez más, estas propiedades están directamente relacionadas con el grado de curado de la resina. La desventaja principal de este tipo de sensores radica de nuevo en que deben quedar embebidos en la resina, lo que significa que las propiedades finales de la pieza pueden verse afectadas y al coste de cada pieza hay que añadir el del propio sensor.

Sensores de la posición del frente de flujo

Dentro de la tecnología de sensorización y control de los procesos de transferencia de resina, se han venido aplicando diversos sistemas de control del frente de flujo. En la literatura podemos encontrar diversos tipos, principalmente basados en medidas de **resistencia eléctrica** del medio, **capacitancia eléctrica**, **dieléctricos** y basados en **fibra óptica**. El principio de funcionamiento de estos sensores se ha venido describiendo a lo largo del presente trabajo, limitándonos en este apartado a citarlos e indicar que pueden funcionar también como detectores de presencia de fluido en el interior del molde.

Sensores capacitivos.

Un sensor capacitivo consta de una sonda situada en la parte posterior de la cara del sensor el cual es una placa condensadora. Al aplicar corriente al sensor, se genera un campo electrostático que reacciona a los cambios de la capacitancia causados por la presencia de un objeto. Cuando el objeto se encuentra fuera del campo electrostático, el oscilador permanece inactivo, pero cuando el objeto se aproxima, se desarrolla un acoplamiento capacitivo entre éste y la sonda capacitiva. Cuando la capacitancia alcanza un límite especificado, el oscilador se activa, lo cual dispara el circuito de

encendido y apagado. Se muestra un ejemplo de sensor capacitivo en la figura 28



Figura 28.- Sensor capacitivo

Sensores capaces del grado de curado y la posición del frente de flujo

Existen tecnologías que implementadas en procesos LCM son capaces de informar sobre el grado de curado de la reacción de polimerización y también sobre la posición del frente de flujo. En el presente trabajo se describe una técnica de tipo conductimétrico desarrollada específicamente para los procesos LCM y otra técnica basada en sensores de flujo de calor que puede utilizarse en distintas aplicaciones.

Sensores de tipo conductimétrico. Sensores Smartweave®

El sistema de sensores desarrollados bajo el nombre comercial de *Smartweave*^{®108} suponen la medida de la corriente continua que discurre entre dos mallas formadas por filamentos octogonales que es introducida en el interior de la cavidad del molde. Cuando la resina ocupa el hueco entre ambas mallas, que funcionan a modo de polos eléctricos, queda cerrado el circuito eléctrico y los equipos de medición asociados a las mallas son capaces de monitorizar la conductividad eléctrica de la resina.

Este sistema consiste en un sensor en forma de rejilla, un paquete electrónico para detectar señales desde el sensor, un ordenador y un software para controlar y almacenar las señales y poder observar los datos

de salida. El sensor en forma de rejilla incluye dos conjuntos ortogonales de filamentos conductores separados por una o más capas de aislante. (figura 29)

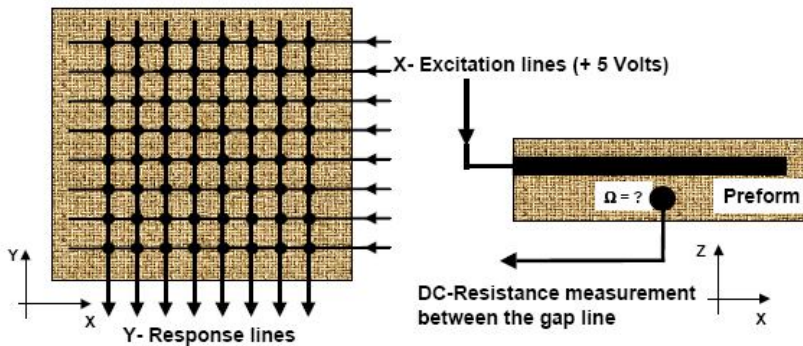


Figura 29.- Sistema Smartweave®

Antes de la impregnación de los sensores por la resina no hay corriente eléctrica en el circuito definido por las dos rejillas ortogonales. Cuando la resina alcanza un nodo, definido por el cruce de dos líneas conductoras ortogonales, la resistencia de la rejilla en conjunto es modificada. Los dispositivos electrónicos auxiliares permiten medir la resistencia en cada uno de los nodos de la rejilla. Un sistema multiplexor (dispositivo que puede recibir varias entradas y transmitir las por un medio de transmisión compartido) permite localizar el nodo que ha sido impregnado, debido a una disminución de la resistencia. El curado de la resina también puede ser monitorizado por un aumento de la resistencia eléctrica. Los dispositivos electrónicos actualizan el voltaje de entrada a la rejilla, con un software basado en LabVIEW® se muestra la posición del frente de flujo y el grado de curado. En la figura 5 se han representado los valores esperados de voltaje en una experiencia, lo que muestra el momento en que la resina alcanza la posición del nodo y el aumento de la resistividad debido a la reacción de polimerización de la resina. En este sentido, algunos sistemas reactivos tales como las resinas viniléster poseen una alta resistividad aún a grados de conversión nulos, por lo que es necesario dopar la resina con

sales orgánicas sin detrimentos en la viscosidad y propiedades mecánicas de la pieza final.

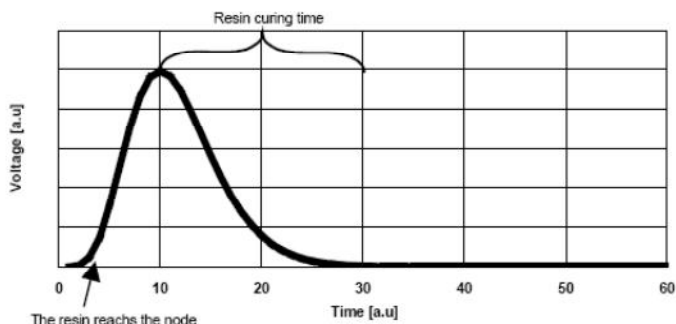


Figura 30.- Medidas de tensión con sensores Smartweave®

Sensores de Flujo de Calor. Sensores Thermoflux®

Los **sensores de flujo de calor** están especialmente indicados para registrar transferencia de calor cuando se están procesando materiales. Una de sus principales características es que no necesitan ser colocados en el interior de la cavidad del molde, sino que pueden montarse superficialmente. Estos sensores entregan información al módulo de adquisición, que es proporcional al flujo de calor que tiene lugar durante la reacción química (exotérmica o endotérmica).

La figura 31 muestra el esquema térmico funcional en la cavidad del molde¹⁰⁹. La cavidad del molde representa la parte reactiva del sensor: es posible, de esta manera, ver las modificaciones estructurales del material durante el procesado.

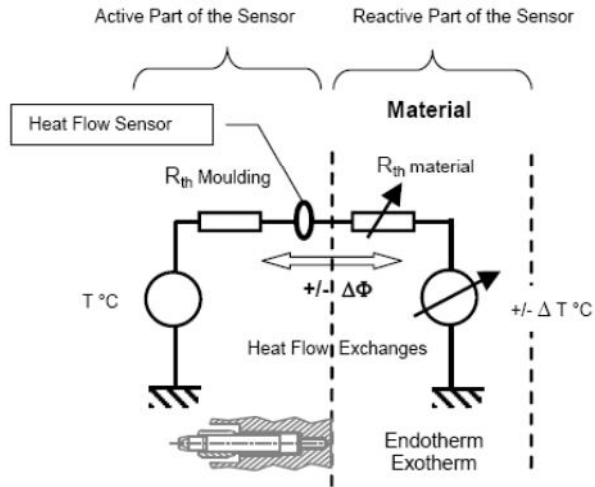


Figura 31.- Esquema del proceso

Un material que va a reaccionar en el interior de un molde requiere una cierta cantidad de energía Q para alcanzar la temperatura del molde T_m :

$$Q = m \cdot C_p (T_m - T_0) \quad (29)$$

Donde m es la cantidad de material y C_p es su capacidad calorífica. Esta energía térmica es transferida entre la interfase molde – material. Para una superficie dada, S y durante un determinado tiempo, Δt se puede introducir el concepto de potencia intercambiada:

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot s} \quad (30)$$

A esta potencia intercambiada Φ (W/m^2) se le conoce como flujo de calor y es medida directamente por un sensor de flujo de calor como los estudiados en el presente trabajo.

Ejemplos de Aplicación.

SMC. Sheet Moulding Compound.

Este proceso típico de la industria de materiales compuestos consiste en la colocación de *prepreg* (lámina de refuerzo preimpregnado de resina termoestable no polimerizada) en la cavidad de un molde. Tras el cierre del molde y el aumento de temperatura, comienza la reacción de polimerización y la pieza adquiere la forma de la cavidad.

En la figura 32 se muestra el resultado de la adquisición de datos de flujo de calor durante dicho proceso SMC.

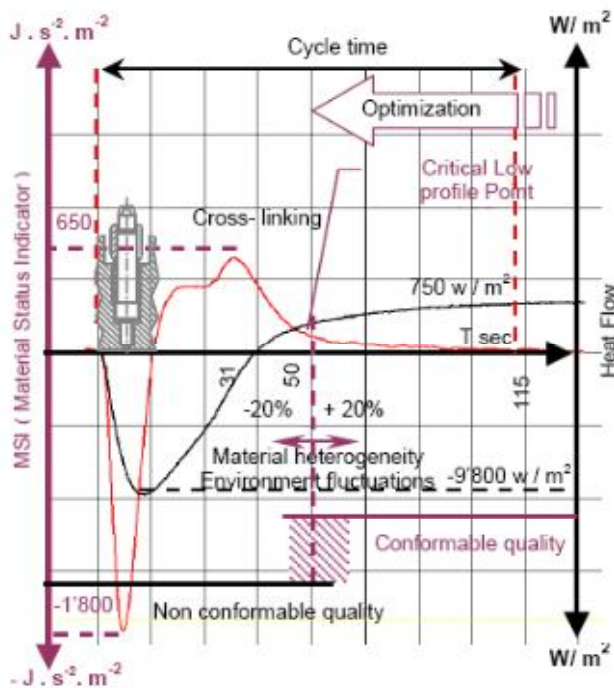


Figura 32.- Flujo de calor en un proceso de prensado de SMC

En dicha figura 32, se observa con una línea negra la evolución del flujo de calor con el tiempo. Con una línea roja, se ha representado la variación del flujo de calor con el tiempo. Es lo que se conoce como *indicador del estado del material (MSI)* y da una idea de los cambios que ocurren en el material con el tiempo.

Cuando comienza la reacción de polimerización de la resina que forma el prepreg (exotérmica), el flujo de calor desde la cavidad hacia el molde comienza a producirse. Este calor, que ha sido generado por la reacción de polimerización de la resina que forma el prepreg, abandona la cavidad siendo de esta forma registrado por el sensor correspondiente. Cuando la velocidad de reacción es máxima se produce el mínimo en la curva. En este momento la exotermia (y por lo tanto la velocidad de reacción) es máxima.

A partir de aquí, la exotermia de la reacción de polimerización va disminuyendo, hasta que el flujo de calor permanece constante a un valor dado por las condiciones ambientales donde se realice el ensayo.

Si atendemos a la curva del **indicador del estado del material**, observamos que puede ser de mayor utilidad cuando tratamos de optimizar el tiempo de ciclo: podemos observar que dicha curva tiende a cero cuando el flujo de calor es constante con el tiempo. De esta manera, cuando dicha curva es prácticamente cero, podemos concluir que la reacción ha terminado y proceder a desmoldear la pieza.

1.6.- Conclusiones

Los procesos de transferencia de resina con ayuda de vacío (VARTM) disfrutan de una aceptación general en la industria para la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica. Para consolidar dicha tecnología en los sectores industriales en los que se emplean en la actualidad y tener cabida en otros de mayor requerimiento tecnológico se hace necesaria la modelización numérica del proceso. Se han detallado en el presente capítulo numerosas aproximaciones para completar la modelización numérica del proceso, dando lugar dos desafíos principales:

- 1) La modelización requiere de un elevado coste de caracterización experimental de la permeabilidad de las preformas utilizadas, puesto que la misma varía con su grado de compactación.
- 2) El coste computacional es muy superior al de la modelización de los procesos de transferencia de resina sin ayuda de vacío, puesto que estos últimos no requieren el acoplamiento del campo de presiones a la permeabilidad.

En resumen, es posible encontrar diferentes estrategias para la simulación de los procesos VARTM:

- 1) La solución más descriptiva de la realidad consiste en utilizar un modelo 3D, en el que se obtuviera el flujo de resina en el plano y a través del espesor. Sería necesario disponer de los valores del tensor completo de permeabilidad y su variación con la presión de compactación. Como se detallará posteriormente, no es posible obtener analíticamente el tensor de permeabilidad ni, lógicamente, su variación con el espesor, por lo que esta estrategia requiere un esfuerzo en caracterización que es difícilmente justificable desde el

punto de vista industrial. Además, el tiempo computacional asociado a la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el proceso es exponencialmente superior a otras estrategias.

- 2) Otra estrategia posible es el desarrollo de un modelo 2.5D, constituido por una serie de elementos en forma de lámina conformada en el espacio, en el que se desprecia el flujo a través del espesor pero se tiene en cuenta la variación de la permeabilidad en función de la presión de compactación. Es posible relacionar la permeabilidad con la porosidad a través de ecuaciones tipo Karman-Kozeny, aunque se necesita de nuevo un considerable esfuerzo experimental en ajustar el comportamiento al tipo de preforma concreto. De la misma manera, se hace necesario relacionar la porosidad con la presión de compactación.
- 3) Una tercera estrategia requiere desacoplar el campo de presiones de la permeabilidad, utilizando valores de *seudo-permeabilidad* o permeabilidad equivalente constantes a lo largo de todo el proceso de inyección. Además de un reducido esfuerzo computacional para la obtención de las soluciones numéricas del campo de presiones (se trata de simulaciones 2.5D), se reduce considerablemente la caracterización experimental necesaria para la determinación de la permeabilidad.

Por lo que se refiere a la caracterización de la permeabilidad de la preforma, tal como se ha ido detallando a lo largo del presente capítulo:

- 1) Los valores de permeabilidad obtenidos experimentalmente dependen del método seleccionado para su determinación. No existe, por lo tanto, un método estandarizado para la medida de permeabilidad que lleve a resultados repetitivos de los tiempos de llenado en la simulación.

- 2) El gradiente de presiones efectivo depende no sólo del aplicado y medido, sino de presiones capilares que modifican la impregnación del tejido.
- 3) Una estrategia numérica requiere un gran esfuerzo no sólo en la determinación del tensor de permeabilidad, sino en su variación con la porosidad y la variación de ésta con la compactación.

Para completar el sistema que permita la fabricación óptima por VARTM, se han revisado las diferentes tecnologías de sensorización disponibles, resultando dicho trabajo en la posibilidad de monitorización en tiempo real tanto de la posición del frente de flujo como del grado de curado de la resina.

Capítulo 2.- Objetivos de la investigación

En la actualidad, existen diferentes procesos de transformación con aplicación a nivel industrial para la obtención de materiales compuestos. En algunos de ellos es necesario el empleo intensivo de mano de obra mientras que otros se encuentran muy automatizados. Unos están pensados para realizar series cortas y otros para series largas. Unos buscan estrictas tolerancias dimensionales mientras otros disponen de poca repetitividad dimensional.

Uno de los procesos más empleados dentro de la tecnología de los materiales compuestos son los denominados *procesos de transferencia de resina* o *liquid composite moulding (LCM)*. Se trata de procesos de molde cerrado en los que una preforma de refuerzo se coloca en el interior de la cavidad de un molde donde posteriormente es inyectada la resina. Este tipo de procesos productivos permiten obtener piezas con resistencia y rigidez prácticamente a medida y pueden crear geometrías realmente complejas. Existen dos tipos principales de procesos de transferencia de resina: los procesos de transferencia de resina (RTM)¹¹⁰ y los procesos de transferencia de resina con ayuda de vacío (VARTM)¹¹¹. Para comprender la forma en que la resina impregna el refuerzo en el interior del molde y poder de esta forma optimizar el proceso industrial es conveniente

modelizar matemáticamente el proceso de inyección^{112,113}. Disponer de un modelo matemático del proceso de inyección permitiría conocer de forma previa a la industrialización del mismo la forma en que la resina fluye por el interior de la cavidad del molde a través de la preforma. Dicha información puede ser utilizada para llevar a cabo un correcto diseño de molde que asegure un llenado óptimo de la pieza con un tiempo de ciclo mínimo, lo que resulta en una alta competitividad del producto fabricado.

Adicionalmente, una estrategia de fabricación completa reduciría la variabilidad inherente a todo proceso de fabricación introduciendo los sistemas de sensorización y control adecuados. La posición del frente de flujo y el avance de la reacción de polimerización (o grado de curado) de la resina son los dos parámetros más importantes de los procesos de fabricación de materiales compuestos mediante técnicas *LCM*. La toma de decisiones de control en función de los datos disponibles relativos a dichos parámetros permitiría asegurar la calidad del producto final al coste más competitivo posible.

Por todo lo anterior, la instrumentación de los útiles de fabricación puede complementar el diseño basado en la modelización del proceso de inyección para obtener mediante la utilización de ambas tecnologías un resultado final óptimo. De esta manera, la presente investigación plantea los siguientes objetivos principales:

1. Desarrollo de una metodología que permita la optimización del proceso de fabricación de materiales compuestos mediante procesos *LCM* con ayuda de vacío basada en:
 - a. La modelización del proceso de inyección de resina y el diseño de los útiles de fabricación en función del resultado.
 - b. La selección de la sensorización y las estrategias de control más adecuadas para la minimización de los efectos debidos a la variabilidad inherente al proceso de fabricación.

2. Desarrollo de una metodología propia para la caracterización de las materias primas que permita una implementación del sistema experto en un entorno industrial.
3. Validación de la metodología propuesta mediante su implementación en banco de ensayos industriales.

El presente trabajo centra su atención en el desarrollo de un método propio de caracterización de una *seudo-permeabilidad*, denominada *permeabilidad flexible* que permite incluir de cierta manera el efecto debido a la compactación de la preforma y aproxima las condiciones de proceso a las de un dispositivo experimental tipo VARTM con contramolde flexible con los siguientes objetivos:

1. Incluir en la propia determinación de la permeabilidad la variación del espesor de la preforma, para evitar el esfuerzo y la fuente de variabilidad que supone la determinación experimental de la relación entre porosidad y permeabilidad y entre porosidad y presión de compactación.
2. Incluir igualmente en la determinación de la permeabilidad en cierta manera las presiones capilares que posteriormente tendrán lugar en la inyección de la preforma, dado que el gradiente de presión utilizado en la caracterización de la permeabilidad es muy similar al utilizado en la propia inyección.

Se propone además la instalación de un sistema de control en el molde que permita corregir las desviaciones observadas por las simplificaciones realizadas. De esta manera, se obtiene un **sistema experto** de reducido coste de implementación que permite abandonar estrategias de ensayo y error para el diseño de moldes de VARTM e incrementa la fiabilidad del proceso por la corrección de la variabilidad encontrada por la disposición manual de los diferentes elementos integrantes del laminado.

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, se han cumplido las siguientes fases:

Fase 1.- Estancias en centros de reconocido prestigio para la formación en modelización de procesos de transferencia de resina. En concreto, se han realizado sendos periodos de formación en:

1. *Center for Composite Materials (CCM)*, de la *Universidad de Delaware*, donde se han explorado las posibilidades del software de modelización *LIMS*.
2. *Chaire sur les Composites à Haute Performance (CCHP)*, de la *Escuela Politécnica de Montreal*, donde se ha realizado una estancia análoga a la anterior para conocer el software *PAM-RTM*.

Fase 2.- Investigación sobre los sensores más adecuados para el control del grado de avance y polimerización de la resina en los procesos de transferencia de resina.

Fase 3.- Investigación sobre la permeabilidad de las preformas en los procesos LCM con vacío. Esta fase se completó con el desarrollo de un banco propio de caracterización de *permeabilidad flexible* y se analizaron los resultados obtenidos.

Fase 4.- Validación del sistema experto. Las fases de modelización y control del proceso se aplicaron a un caso particular de fabricación de pieza de grandes dimensiones y se comprobaron los resultados obtenidos.

Capítulo 3. Metodología de Trabajo

3.1.- Permeabilidad Flexible

La permeabilidad flexible mide la permeabilidad de un refuerzo en condiciones similares a la de los procesos VARTM. Para ello, el dispositivo experimental de medida de permeabilidad lineal ha sido modificado, de tal forma que la cavidad no tiene un volumen constante durante todo el proceso de inyección, sino que el contramolde ha sido sustituido por una bolsa de vacío que permita que el espesor de la cavidad varíe en función de la posición del frente de flujo. Esta situación es la que tendrá lugar en el propio proceso VARTM.

3.1.1.- **Dispositivo Experimental para la Medida de la Permeabilidad Flexible.**

A continuación se muestra el trabajo desarrollado para la determinación experimental de la *permeabilidad flexible* de tejidos empleados como refuerzo en materiales compuestos. Los resultados se mostraron en el *10th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, que tuvo lugar en Julio de 2010 en Ascona (Suiza).

En la figura 33 se muestra el diseño del banco de medida de permeabilidad flexible desarrollado en la presente investigación.

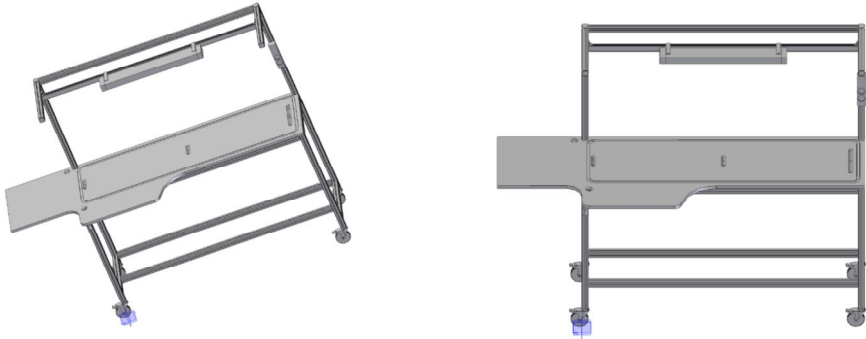
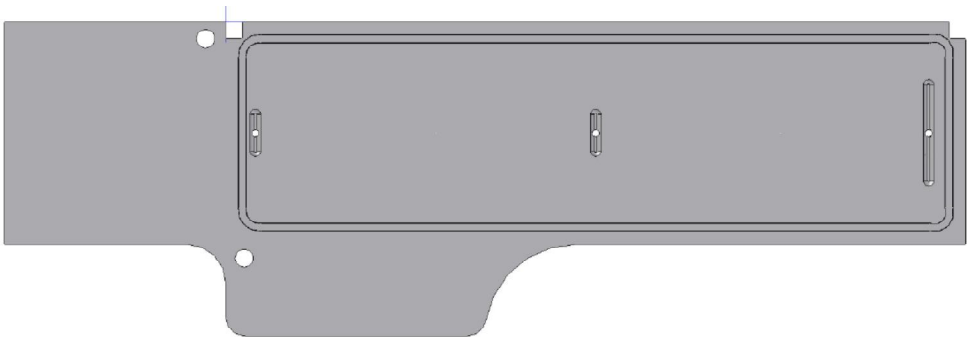


Figura 33.- Diseño del banco de permeabilidad flexible

En la figura 34 se muestra un detalle de la parte superior e inferior del propio banco de permeabilidad.



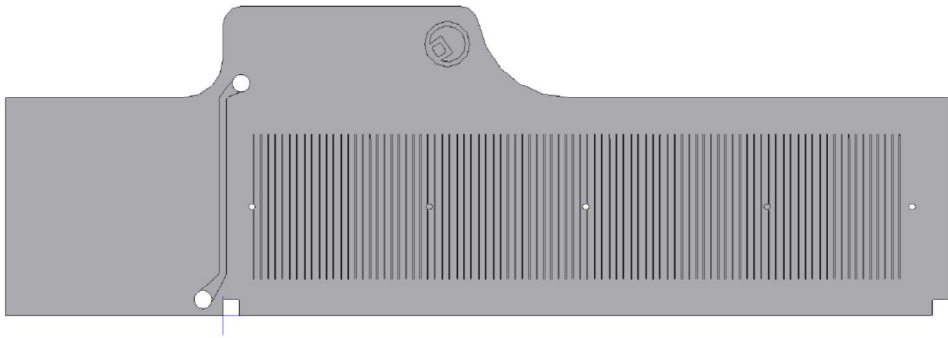


Figura 34.- Vista superior en inferior del banco de permeabilidad

El banco de permeabilidad se ha realizado empleando polimetilmetacrilato como material de construcción. Dado que este material es transparente, es posible observar el flujo de resina tanto por la parte superior como por la inferior. Esto permite observar el avance del frente de flujo en la parte superior del laminado (que corresponde generalmente a la posición del medio de distribución de resina) y en la parte inferior (que correspondería al avance del frente de flujo en la zona del laminado más cercana al molde). De esta manera, el banco diseñado nos permitiría investigar también el retraso en el avance del frente de flujo entre el medio de distribución de resina y la propia preforma.

El tejido cuya permeabilidad flexible va a ser medida, se corta y se sitúa sobre el banco de permeabilidad con su eje longitudinal perfectamente alineado con el eje longitudinal del banco de permeabilidad. Una vez colocado el tejido, se dispone la junta sellante en el canal correspondiente y se coloca el medio de distribución, el film desmoldeante y la bolsa por encima de todo el conjunto. Entonces se aplica el vacío y se comprueba el correcto sellado.

El banco de permeabilidad dispone de un orificio para la inyección de resina (que comunica con un canal de reparto transversal al flujo) y dos puntos por donde es posible realizar el vacío en función de la longitud

deseada de la preforma. Tanto los canales de vacío como el de inyección están dotados de los correspondientes sensores de presión, necesarios para la precisa medida de la permeabilidad. Durante la inyección, el operador puede observar el avance del frente de flujo a través del film flexible, e ir informando de su posición, con el correspondiente pulsador, al sistema automatizado de medida.

La medida experimental de permeabilidad conlleva la inyección de un refuerzo y la toma de múltiples pares de valores en un tiempo relativamente corto. Esto hace necesario la implementación de algún sistema de toma de datos automatizado que minimice los errores en la observación de la medida. En este sentido, se ha implementado al banco de permeabilidad un sistema de adquisición de datos y un software para el posterior tratamiento de datos que ha sido desarrollado en la Escuela Politécnica de Montreal denominado Polyper®.

Para la adquisición de datos en PC es necesaria la instalación de una tarjeta de adquisición de datos que sea capaz de transformar las medidas analógicas del proceso en digitales y sea además capaz de registrar las medidas digitales. El método de medida es el siguiente:

El técnico de laboratorio inicia la inyección de la preforma. A medida que el frente de flujo avanza, el técnico informa al equipo de adquisición de la posición del frente de flujo mediante el empleo de un pulsador, basándose en un conjunto de marcas realizadas sobre el semimolde flexible. Adicionalmente, un sensor indica continuamente la presión de inyección al sistema.

En la figura 35 se muestra el sensor de presión y la tarjeta de adquisición de datos empleada.



Figura 35.- Sensor de presión y tarjeta de adquisición de datos

La tabla 5 muestra los detalles de la tarjeta de adquisición de datos y del sensor de presión:

Tabla 6.- Equipos empleados para la adquisición de datos

| Equipo | Marca y Referencia |
|-------------------------------|---------------------------|
| Tarjeta de Adquisición | DATAQ DI-194RS |
| Sensor de Presión | LENDER CPS-010B0-A |

El banco de permeabilidad para VARTM ha sido instalado en la planta piloto de AIMPLAS – Instituto Tecnológico del Plástico. En la figura 36 se muestra el proceso de montaje del banco de permeabilidad flexible.



Figura 37.- Ensamblado del banco de permeabilidad

Ignorando la variación en el espesor debido al contramolde flexible, tal como se ha detallado en el capítulo anterior, en un molde rectangular de sección constante, la ley de conservación de masa para el fluido requiere que la velocidad permanezca constante en el espacio para un tiempo dado. Este hecho, combinado con la Ley de Darcy resulta en un gradiente de presión constante. En otras palabras, la presión disminuye linealmente desde $P_0(t)$ en el punto x_0 hasta la presión de vacío a una distancia $x_{ff}(t)$. Se puede estimar la pérdida de presión como:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{P_0(t)}{x_{ff}(t)} \quad (22)$$

En esta ecuación asumimos que $P_0(t)$ varía con el tiempo ya que no es posible mantener un valor perfectamente constante en las instalaciones de medida de permeabilidad.

3.1.2.-Tratamiento de datos experimentales para la obtención de la permeabilidad.

Siguiendo la derivación de la Ecuación de Darcy y su sustitución en la ecuación de continuidad e integración atendiendo a las condiciones de contorno adecuadas tal como se concluye en la ecuación (21), Ferland⁶⁴ desarrolla tres métodos distintos para la correlación de los datos experimentales que se detallan a continuación.

Método Elemental

La Ley de Darcy establece que la velocidad del fluido es proporcional al gradiente de presión. La primera técnica para la medida de permeabilidad consiste en medir el gradiente de presión y la velocidad durante una inyección. Así, la permeabilidad se obtiene de los pares de valores velocidad/pérdida de presión. Este último es calculado con la ecuación (22). Como la velocidad no puede determinarse directamente, se usan los valores de posición del frente de flujo (x_i) y tiempo transcurrido (t_i). De esta manera, la velocidad puede obtenerse como:

$$V(t_i) = \frac{1}{2} \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} + \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) \quad (23)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (22) y (23), se construye una tabla formada por dos columnas. La primera de ellas corresponde a cada tiempo (t_i) y la segunda se calcula como:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{V(t_i)} \quad (24)$$

Con esta información, la permeabilidad K_{ele} puede obtenerse por medios gráficos tal como el ajuste por mínimos cuadrados de la recta resultante de la representación gráfica de la tabla.

Método de Interpolación.

Teniendo en cuenta la ley de conservación de masa en un molde rectangular y un fluido incompresible⁹ puede derivarse la Ley de Darcy hasta:

$$a = \frac{\sum x_i \sqrt{I_t}}{\sum I_t} \quad (25)$$

Donde I_t se obtiene de la integración aproximada de:

$$x_f(t) = \left[\frac{2K}{\mu} I(t) \right] \quad (26)$$

El valor de K se obtiene de:

$$K_{\text{int}} = \left[\frac{a^2 \mu}{2} \right] \quad (27)$$

Método del Punto Único.

El método del punto único usa un único par (x_i, l_i) para calcular una rápida aproximación de K , según:

$$K_{\text{pu}} = \left[\frac{x_i^2 \mu}{2l_i} \right] \quad (28)$$

Aunque este método es muy simple, puede ofrecer buenos resultados cuando la posición del frente de flujo está suficientemente alejada de la inyección. No obstante, no es recomendable usar este valor de permeabilidad para simular el llenado de piezas grandes, sino más bien cuando la pieza a llenar es pequeña o existen multitud de puntos de inyección.

3.1.3.- Efecto de los núcleos y radio de curvatura del molde.

La presencia de núcleos de distinta naturaleza en los laminados permite un aumento de la rigidez de la pieza con un coste sensiblemente inferior al de un laminado del mismo espesor. Además, el peso del laminado con núcleo (o *sándwich*) es por regla general inferior al de un laminado sin núcleo. De esta manera, donde se requiera cierta rigidez (con espesores de varios centímetros), los núcleos se utilizan de forma generalizada.

Los núcleos que se utilizan en procesos VARTM deben satisfacer los siguientes requerimientos de proceso:

1. Deben ser conformables: pese a que los núcleos son materiales rígidos debe ser posible adaptarlos al radio de curvatura del molde en el que se va a fabricar la pieza. Para ello, generalmente se suministran con una serie de cortes longitudinales y transversales que les permiten ser adaptados a la forma del laminado (figura 38).



Figura 38.- Cortes longitudinales para el conformado del núcleo

2. Deben permitir el flujo de resina: como se encuentran en las capas interiores del laminado, deben permitir el paso de resina a su través y en su longitud, para permitir la correcta impregnación del refuerzo de las pieles. Por ello, es frecuente observar la presencia superficial de canales de reparto de resina y de una serie de perforaciones repartidas homogéneamente a través de todo el núcleo para permitir que la resina que fluye por una de las pieles, pueda traspasar el refuerzo e impregnar la otra piel (figura 39).

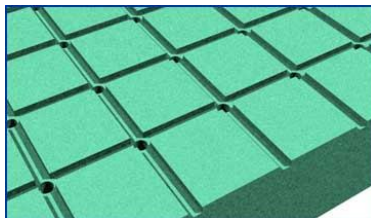


Figura 39.- Detalle de canales longitudinales y perforaciones en un núcleo de PVC

La presencia de dichos medios de distribución de resina en los núcleos influye considerablemente en la evolución del frente de flujo de resina en la cavidad del molde y en los tiempos de llenado, por lo que su presencia

debe ser considerada para reproducir correctamente el proceso. Una estrategia posible para ello sería modelizar el núcleo como una placa no permeable en la que se han practicado canales de reparto de resina o *runners*. Sin embargo, dicha estrategia presenta los siguientes inconvenientes:

1. Exige poner en marcha una simulación 3D, por lo que sería necesario determinar el tensor completo de permeabilidad (*en el plano y a través del espesor*) y su variación con la porosidad (y la variación de ésta con el campo de presiones).
2. El tamaño de los canales existentes en el núcleo varía con el radio de curvatura del molde, por lo que sería necesario relacionarlo en la simulación.

En el presente trabajo se ha estudiado cómo varía el flujo de resina en diferentes laminados con núcleo. Además, el radio de curvatura del molde obliga a conformar el núcleo de forma que las perforaciones longitudinales se convierten en canales de alta velocidad de flujo de resina. Para estudiar este proceso, se han fabricado postizos con diferentes radios de curvatura que han sido colocados en la base del banco de permeabilidad flexible. Esto permite determinar la variación de la permeabilidad flexible del laminado con el radio de curvatura del molde.

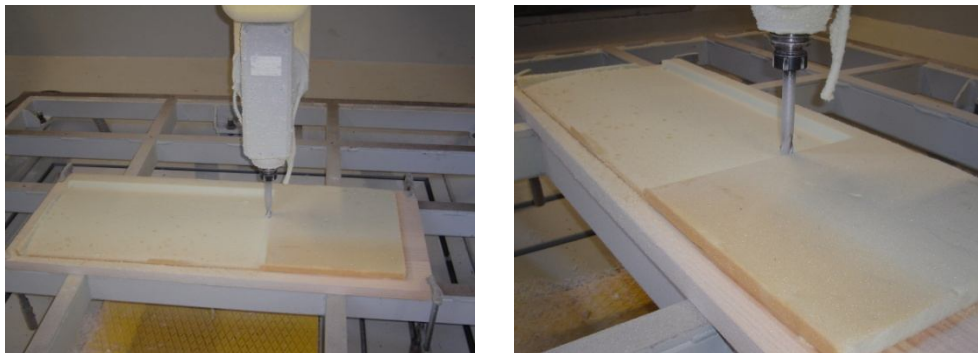


Figura 40.- Fabricación de postizos

El objetivo de este estudio es la simplificación de la estrategia necesaria para simular el flujo de resina en procesos VARTM con presencia de núcleos. Al concepto de *permeabilidad flexible* se añade su relación con el radio de curvatura del molde, lo que permite:

1. Mantener una estrategia de simulación 2.5D. Por ello, sólo será necesaria la determinación de la permeabilidad en el plano.
2. Utilizar el dispositivo experimental para la determinación de la permeabilidad flexible para conocer su relación con el radio de curvatura.

Los diferentes postizos se colocan sobre la base del banco de permeabilidad flexible, de tal forma que su radio de curvatura obliga a la apertura de canales longitudinales en el núcleo (figura 41), lo que supone un efecto tipo *race tracking* en cada uno de dichos canales.



Figura 41.- Canales abiertos en el núcleo por el efecto del radio de curvatura del molde



Figura 42.- Preforma colocada sobre el núcleo. Los canales del núcleo distorsionarán el flujo



Figura 43.- Dispositivo experimental para el cálculo de la permeabilidad flexible con núcleo

Para observar el proceso se ha utilizado madera de balsa (BL6.5R de NIDACORE®) sobre la que se coloca el refuerzo sobre el que se quiere observar el flujo (figura 42) y se cierra el dispositivo con la bolsa de vacío (figura 43).

Tafetán de fibra de vidrio.

Los resultados de la caracterización de la permeabilidad flexible del tafetán 0/90 sobre el núcleo de madera de balsa sometido a distintos radios de curvatura se muestra en la Tabla 7

Tabla 7.- Permeabilidad flexible del tejido RT 400 0001 sobre madera de balsa (BL6.5R)

| Tafetán 0/90 fibra de vidrio | | | |
|------------------------------|-----------|------------|--|
| Ancho (mm) | Alto (mm) | Radio (mm) | $K_{\text{FLEX}/0}$ (10^{-10} m^2) |
| 300 | 0 | | 1.63 ± 0.24 (14.7%) |
| 300 | 10 | 1056.2 | 21.7 ± 4.3 (19.8%) |
| 300 | 20 | 535.6 | 49.1 ± 6.5 (13.2%) |
| 300 | 30 | 365,4 | 52.2 ± 4.8 (9.2%) |

Los resultados se muestran de forma gráfica en la figura 44

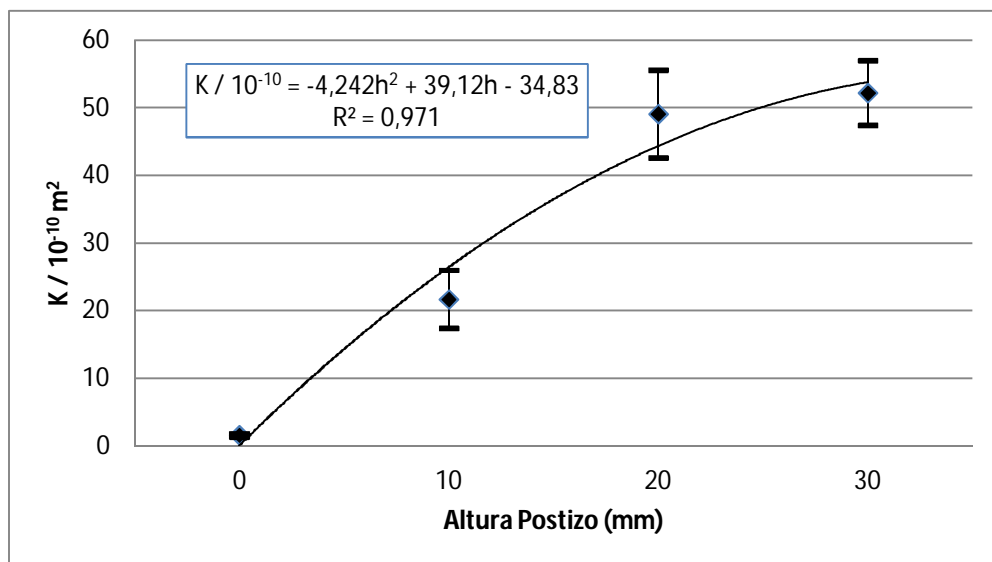


Figura 44.- Permeabilidad Flexible de Tafetán 0/90 sobre madera de balsa y núcleo de diferente radio de curvatura

Rovicore® 450-D3-450

Los resultados obtenidos para el Rovicore® 450-D3-450 se muestran la tabla 8 y la figura 45.

Tabla 8.- Permeabilidad flexible del Rovicore® 450-D3-450 sobre madera de balsa (BL6.5R)

| Rovicore® 450-D3-450 | | | |
|----------------------|-----------|------------|---|
| Ancho (mm) | Alto (mm) | Radio (mm) | $K_{FLEX/0}$ (10^{-10} m^2) |
| 300 | 0 | | 71.2±7.4 (10.4%) |
| 300 | 10 | 1056.2 | 118.6±9.5 (8.0%) |
| 300 | 20 | 535.6 | 132.3±12.2 (9.2%) |
| 300 | 30 | 365,4 | 157.6±18.8 (11.9%) |

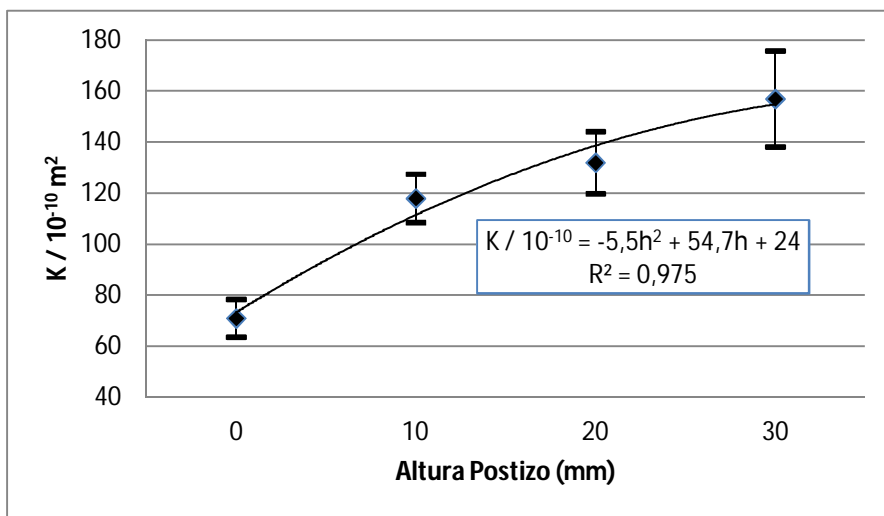


Figura 45.- Permeabilidad Flexible del Rovicore® 450-D3-450 sobre madera de balsa y núcleo de diferente radio

3.2.- Implementación de sensores thermoflux en planta piloto

La motivación del uso de sensores de flujo de calor en el presente trabajo es la investigación de su utilidad en la monitorización del avance de frente de flujo y curado de resinas termoestables. Se trata de comprobar si este tipo de tecnología es útil para la implementación de un sistema de control que permita optimizar el proceso VARTM y complementar el esfuerzo hecho en la simulación, de tal forma que sea posible corregir las diferencias encontradas en el proceso real. Para ello, se ha preparado un dispositivo experimental para el proceso de VARTM en el que se han instalado sensores *thermoflux*[®] y se han realizado diversas experiencias.

3.2.1.- Dispositivo Experimental.

En la figura 46 se muestra el banco de ensayos donde se han desarrollado las experiencias en planta piloto. Se trata de un molde tipo, con diferentes acabados superficiales y formas para que pueda apreciarse la disposición de las fibras y la resina. Para nuestra investigación concreta, si bien no nos ofrece información adicional este tipo de irregularidades, el tamaño del molde nos permite llevar a cabo experiencias semi-industriales, que tienen directa aplicación a casos prácticos dadas las dimensiones del mismo.



Figura 46.- Molde VARTM

Para inyectar la resina en el interior del molde se ha utilizado un equipo de inyección marca APPLICATOR, modelo RI2. Se trata de una máquina capaz

de hacer la mezcla resina + sistema catalítico previo a la introducción de la resina en el molde. Dispone de un interfaz gráfico que permite seleccionar parámetros tales como el porcentaje deseado de catalizador, la cantidad de resina y caudal inyectado. En la figura 47 se muestran imágenes del equipo de inyección



Figura 47.- Equipo de inyección

3.2.2.- Sensores de Flujo de Calor Thermoflux® y accesorios para adquisición de datos.

Se han utilizado dos sensores de flujo de calor suministrados por la empresa suiza Thermoflux®. Adicionalmente a los sensores de flujo de calor, estos dispositivos incluyen sendos termopares tradicionales, cuyas medidas pueden también almacenarse en tiempo real. Además, ha sido necesario el empleo de dos módulos de conversión analógico/digital que son responsables de transformar la información analógica (medida de tensión) en digital, para poder ser procesada por un computador.

Las características de los sensores y los módulos de conversión A/D se detallan en el *Anexo I: fichas técnicas de sensores de flujo de calor y accesorios*. El esquema de conexión de PC, módulos de conversión y sensores se muestra en la figura 48.

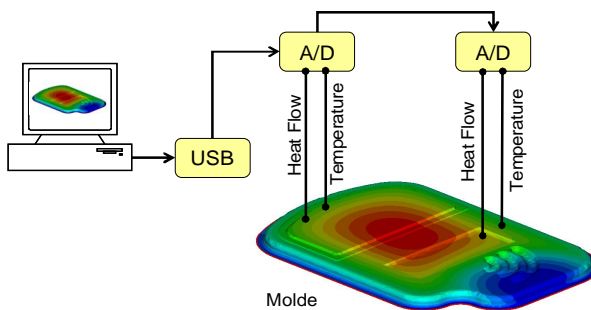


Figura 48.- Esquema de conexión de módulos y sensores

3.3.- Metodología para la simulación del proceso de infusión y comparación con los resultados experimentales

Como banco de ensayos se ha diseñado una pieza que corresponde a la base de un triciclo ligero para el transporte urbano de personas que se muestra en la figura 49. El molde se ha fabricado como parte de un proyecto del *Instituto para el Diseño y Fabricación Automatizada (IDF)*. El resultado del presente trabajo se ha utilizado para la optimización de la fabricación del triciclo.



Figura 49.- Triciclo

El diseño de pieza se ha transformado en un modelo en poliuretano con el uso de un equipo de control numérico (figura 50). El modelo se ha utilizado para la fabricación del molde que se muestra en la figura 51

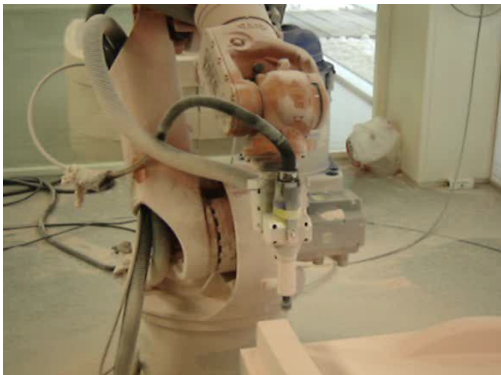


Figura 50.- Modelo para la fabricación de molde



Figura 51.- Banco de ensayos

Se ha utilizado un equipo de vacío marca GlasCraft, modelo COMPOSITVAC que se muestra en la figura 52.



Figura 52.- Equipo de vacío

Entre el equipo de vacío y la cavidad del molde se ha colocado la trampa de vacío que se muestra en la figura 53. En la trampa se ha incluido un barómetro que permite comprobar la estanqueidad del molde. Para ello, una vez realizado el vacío, se comprueba que no existen fugas superiores a 5 mBar/min. En la detección de las posibles fugas se ha utilizado el equipo amplificador de ultrasonidos mostrado en la figura 54.



Figura 53.- Trampa de vacío



Figura 54.- Detector de fugas

Se ha utilizado una resina de poliéster ortoftálica especialmente formulada para infusión (DSM® Synolite 7410-G-1), cuya viscosidad se ha determinado de forma previa a cada inyección con un viscosímetro Brookfield DVII+Pro. La viscosidad nominal de la resina a 23°C se encuentra comprendida en el rango entre 120 mPa·s y 160 mPa·s.

Dado que el banco de ensayos fabricado tiene una superficie total de 5 m², para la inyección en condiciones VARTM será necesario un tiempo total que probablemente suponga cierto incremento en la viscosidad de la resina, debido al avance de la reacción de polimerización. Es necesario, por lo tanto, conocer la variación de la viscosidad de la resina con el tiempo. Para ello, se ha preparado la resina con el sistema catalítico seleccionado y se ha medido su viscosidad con el tiempo hasta el estado de gel. En la tabla 9 se muestran los ensayos de viscosidad realizados. Como catalizador se ha utilizado peróxido de metiletilcetona (PMEK). Como acelerante, una disolución al 6% de Octoato de Cobalto (OcCo).

Tabla 9.- Sistemas catalíticos evaluados

| Ensayo | Porcentaje en masa de PMEK | Porcentaje en masa de OcCo |
|--------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 1 | 0.1 |
| 2 | 0.5 | 0.05 |

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 55, donde se observa un brusco aumento de la viscosidad que puede relacionarse con la reacción de polimerización a los 100 minutos para el sistema catalítico 1 y a los 300 minutos para el sistema catalítico 2. Esta información se utiliza posteriormente para, a partir de la simulación del llenado realizada para cada uno de los tejidos, escoger el sistema catalítico que resulta en una baja viscosidad de la resina hasta completar el llenado.

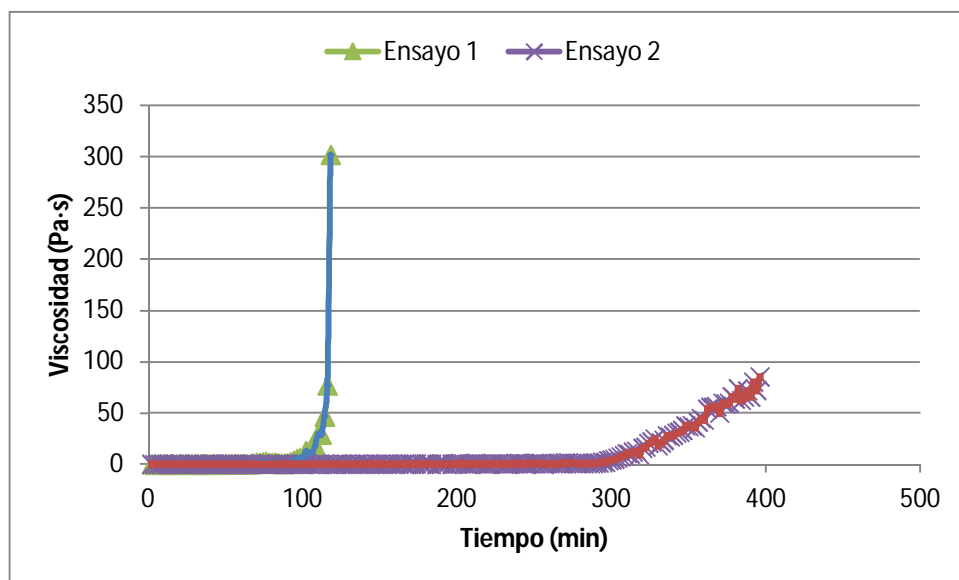


Figura 55.- Evolución de la viscosidad durante la inyección

3.3.1.- Software de simulación

Para llevar a cabo la simulación del llenado del banco de ensayos se ha utilizado el software PAM-RTM® 2010 cedido por ESI-Group® para la

realización del presente trabajo. Las simulaciones realizadas se caracterizan por lo siguiente:

- 1) Se utiliza el módulo RTM, ya que al emplear *permeabilidad flexible* se desprecia el efecto de la compactación y la variación de la permeabilidad en el modelo ya que se incluye en la propia caracterización.
- 2) Se incluye la variación de la viscosidad con el tiempo empleado la fórmula de potencia correspondiente.
- 3) Se modela la malla de distribución como una zona de alta permeabilidad (*runner*).
- 4) La malla utilizada (figura 56), de 14.766 nodos y 29.298 elementos, permite una simulación 2.5D.

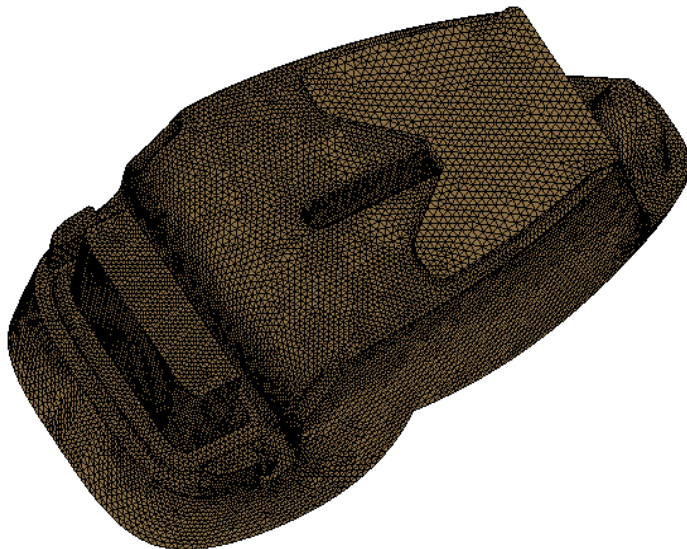


Figura 56.- Malla utilizada

3.3.2.- Simulación del proceso VARTM para los diferentes tejidos utilizados.

En el presente trabajo se han realizado diversas simulaciones del proceso de inyección correspondientes a las condiciones experimentales llevadas a cabo en la planta piloto de AIMPLAS. Para cada uno de los refuerzos utilizados en planta se ha realizado una simulación utilizando PAM-RTM® (tabla 10).

Tabla 10.- Simulaciones realizadas

| Simulación | Refuerzo |
|------------|--|
| 1 | Mat fibra de vidrio (150 g/m ²) |
| 2 | Tafetán 0/90 fibra de vidrio (402 g/m ²) |
| 3 | Tafetán 0/90 fibra de yute (360 g/m ²) |
| 4 | Híbrido Mateglas® Pro1 (1000 g/m ²) |

Para llevar a cabo las diferentes simulaciones se han seguido los pasos que se detallan a continuación.

1.- En primer lugar es necesario seleccionar el tipo de simulación. Dado que va a utilizarse *permeabilidad flexible*, la simulación se realiza utilizando un modelo tipo RTM, en el que no se tiene en cuenta el cambio del espesor de la cavidad con el tiempo.

2.- El siguiente paso consiste en la carga de la malla que representa el sistema completo correspondiente al molde y sus puntos característicos, así como a la cavidad del mismo. En este caso se ha utilizado la malla mostrada en la figura 56, de 14.766 nodos y 29.298 elementos. Dicha malla corresponde en realidad a un conjunto de elementos bidimensionales distribuidos tridimensionalmente, dando lugar a una malla *pseudotridimensional* también conocida como 2.5D.

3.- Es necesario seleccionar las condiciones de contorno del sistema. Para ello, en primer lugar se seleccionan los nodos correspondientes al borde

inferior de la cavidad y se crea el *grupo* de nodos correspondiente (figura 57).

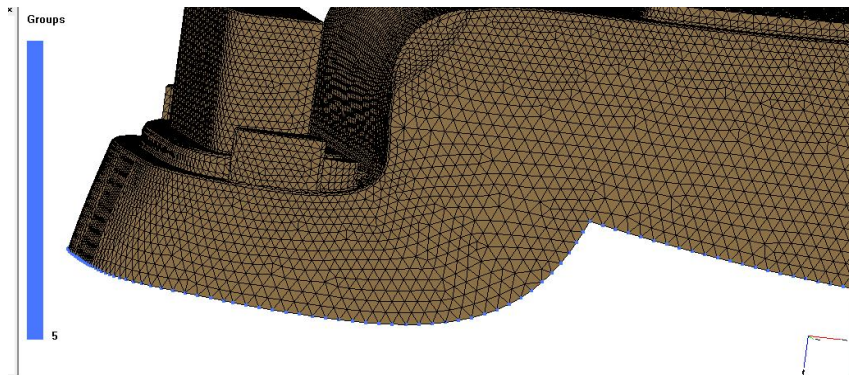


Figura 57.- Inyección de resina

4.- A continuación, se divide la cavidad en dos zonas. La primera consiste en una banda de 5 cm junto a la inyección de la resina en la que va a colocarse un medio de distribución que facilite el avance de la resina y minimice los efectos sobre el flujo consecuencia del contacto entre el tubo de espiral por donde se realiza la inyección y el propio refuerzo. Se trata de homogeneizar la entrada de resina en la cavidad (figura 58).

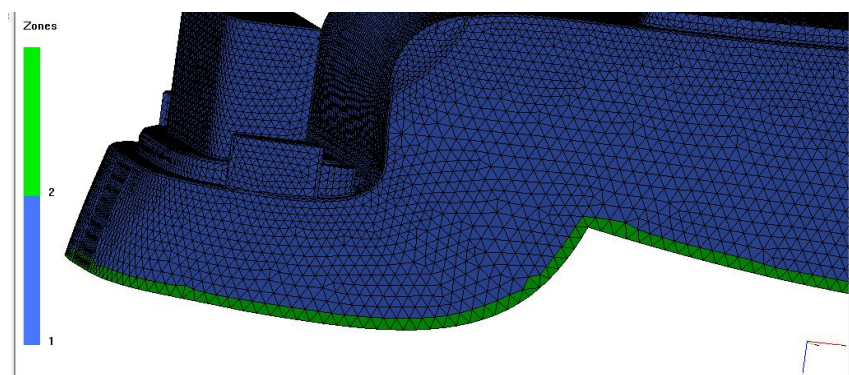


Figura 58.- Malla de distribución

5.- Para reproducir adecuadamente el comportamiento de la viscosidad mostrado en la figura 55, se ha utilizado una variación lineal de la viscosidad con el tiempo con dos etapas diferenciadas: en la primera, la viscosidad es constante con el tiempo hasta que, en un determinado instante, se produce un rápido aumento de la misma. En función del sistema catalítico empleado y la temperatura en la planta piloto se ha ajustado la viscosidad de la primera etapa y el tiempo en el que se produce el cambio a la segunda etapa para cada una de las simulaciones realizadas (figura 59).

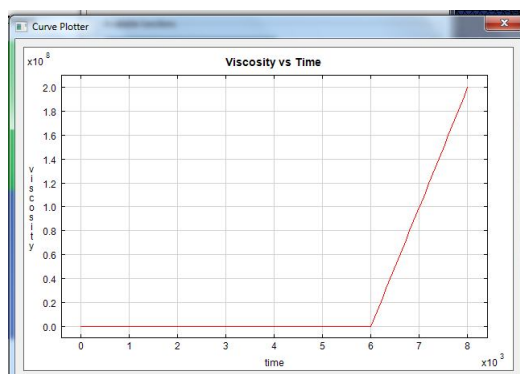


Figura 59.- Expresión utilizada para describir el comportamiento de la viscosidad

6.- En cuanto a la preforma utilizada, se ajustan los valores de permeabilidad en las direcciones K1 (dirección principal de permeabilidad) y K2 (permeabilidad en la dirección ortogonal en el plano a K1). El valor K3 no se utiliza debido a que el sistema se modela en 2.5D, por lo tanto, no existe flujo a través del espesor de la preforma. En las preformas tipo *mat* e híbridas se obtiene una resistencia al flujo igual en todas las direcciones del plano, por lo que K1 tiene el mismo valor que K2.

7.- A continuación se asignan a cada zona de la malla las preformas utilizadas. La zona 2 (figura 58) se modela arbitrariamente con una permeabilidad 10 veces superior a la correspondiente a la zona 1. De esta

manera se consigue una distribución muy rápida de la resina en la zona correspondiente a la inyección.

8.- Por lo que respecta a la fuerza impulsora de la resina hacia la cavidad del molde, se selecciona *a presión constante* para reproducir el gradiente de presiones originado entre la atmósfera y el vacío creado en la cavidad.

Capítulo 4. Resultados y Discusión: Sensorización y Simulación de los procesos VARTM con *permeabilidad flexible*.

4.1.- Introducción

La simulación de los procesos LCM de forma previa a la fabricación de los propios útiles permite mejorar la competitividad de los productos y aumentar su calidad, reduciendo los costes asociados al rechazo de materias primas y los tiempos de ciclo y asegurando la impregnación de la preforma, resultando en unas propiedades mecánicas óptimas con el mínimo coste de fabricación. Sin embargo, reproducir analítica o numéricamente el proceso de inyección tiene una serie de dificultades todavía no resueltas que han sido expuestas a lo largo del presente trabajo.

En procesos VARTM, la situación es todavía más compleja al acoplarse diversas propiedades físicas de los elementos que componen el sistema, fundamentalmente la presión de compactación, el espesor, la fracción volumétrica de refuerzo y la permeabilidad. Existen diversas estrategias para abordar esta problemática:

- 1) La solución más descriptiva de la realidad consiste en utilizar un modelo 3D, en el que se obtuviera el flujo de resina en el

plano y a través del espesor. Sería necesario disponer de los valores del tensor completo de permeabilidad y su variación con la presión de compactación. Como se detallará posteriormente, no es posible obtener analíticamente el tensor de permeabilidad ni, lógicamente, su variación con el espesor, por lo que esta estrategia requiere un esfuerzo en caracterización que es difícilmente justificable desde el punto de vista industrial. Además, el tiempo computacional asociado a la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el proceso es exponencialmente superior a otras estrategias.

- 2) Otra estrategia posible es el desarrollo de un modelo 2.5D, constituido por una serie de elementos en forma de lámina conformada en el espacio, en el que se desprecia el flujo a través del espesor pero se tiene en cuenta la variación de la permeabilidad en función de la presión de compactación. Es posible relacionar la permeabilidad con la porosidad a través de ecuaciones tipo Karman-Kozeny, aunque se necesita de nuevo un considerable esfuerzo experimental en ajustar el comportamiento al tipo de preforma concreto. De la misma manera, se hace necesario relacionar la porosidad con la presión de compactación.
- 3) Una tercera estrategia requiere desacoplar el campo de presiones de la permeabilidad, utilizando valores de *seudo-permeabilidad* o permeabilidad equivalente constantes a lo largo de todo el proceso de inyección. Además de un reducido esfuerzo computacional para la obtención de las soluciones numéricas del campo de presiones (se trata de simulaciones 2.5D), se reduce considerablemente la caracterización experimental necesaria para la determinación de la permeabilidad.

En el presente capítulo se aborda la tercera estrategia. Utilizando la caracterización de la *permeabilidad flexible* para una serie de materiales, un *software* de simulación y un banco de ensayos especialmente diseñado y fabricado se van a realizar diversas simulaciones y se compararán los resultados obtenidos con inyecciones reales en dicho banco de ensayos.

El objetivo último del presente trabajo es la validación de la estrategia propuesta, investigando sus limitaciones y estableciendo escenarios de aplicación industrial válidos.

4.2.- Puesta en marcha del banco de permeabilidad flexible

Para la puesta en marcha del banco de permeabilidad flexible se han seleccionado una serie de refuerzos de fibra de vidrio de diferente tipología. En la puesta en marcha del banco se pretenden obtener los valores de permeabilidad flexible a partir de los pares de valores posición – tiempo a lo largo del experimento. El tratamiento de dichos pares de valores, junto con la medida del gradiente de presión, permiten la determinación de la permeabilidad flexible elemental, interpolada y de punto único.

Se han analizado dos familias de refuerzos distintas: la primera de ellas está compuesta por tejidos típicamente utilizados en la tecnología de procesos de transferencia de resina sin ayuda de vacío. Dichos refuerzos se utilizan generalmente con gradientes de presión de resina elevados que permiten el flujo de la misma a su través ya que la permeabilidad de los mismos, como se verá posteriormente, es muy reducida. La segunda familia de refuerzos analizados es la correspondiente a los tejidos que se usan generalmente en procesos de transferencia de resina con ayuda de vacío. Este tipo de refuerzos son en realidad una combinación de refuerzos con una disposición tipo sándwich en la que el núcleo está formado por un material muy permeable a la resina que posibilita el proceso con bajos gradientes de presión.

Dentro de la familia de los tejidos empleados generalmente en procesos sin vacío se ha determinado la permeabilidad flexible de los tejidos que se muestran en la tabla 11.

Tabla 11.- Características de tejidos caracterizados (típicos RTM)

| Referencia | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|----------|----------|----------|---------|
| Arquitectura | Mat | Mat | Tafetán | Tafetán |
| Gramaje nominal (g/m²) | 150 | 450 | 402 | 360 |
| Material | Vidrio E | Vidrio E | Vidrio E | Yute |

Como fluido se ha utilizado una disolución de jarabe de glucosa, cuya viscosidad se ha determinado de forma previa a la inyección en cada uno de los ensayos. Las disoluciones de jarabe de glucosa ofrecen una viscosidad constante a lo largo del ensayo, permiten la rápida limpieza del dispositivo experimental y reducen los riesgos inherentes al manejo de resinas. La viscosidad ha sido medida con un viscosímetro Brookfield DVII+Pro, cuyos resultados se muestran en la figura 60. Para simular la viscosidad de una resina típica de infusión se ajustó la viscosidad de la disolución de glucosa a 0.1Pa·s.

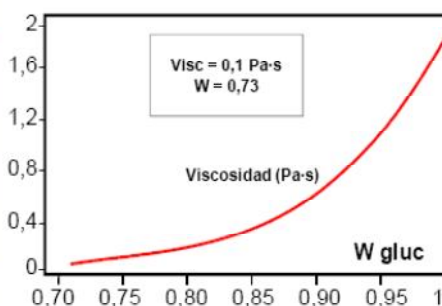


Figura 60.- Viscosidad de la disolución de glucosa con su concentración

Mat de Hilos Continuos de 150 g/m²

El mat de hilos continuos de fibra de vidrio es uno de los tejidos más empleado en la tecnología de los materiales compuestos. La disposición de las fibras continuas de vidrio, realizada al azar, confiere a los composites realizados con este tipo de refuerzo unas propiedades mecánicas casi isotrópicas en el plano. Tal disposición aleatoria impide llegar a niveles altos de empaquetamiento de las fibras, por lo que la porosidad del refuerzo en el molde es alta, dando altos porcentajes de resina en el producto final. En la figura 61 se muestra el avance del frente de flujo con el tiempo en el transcurso de uno de los ensayos de caracterización de permeabilidad:

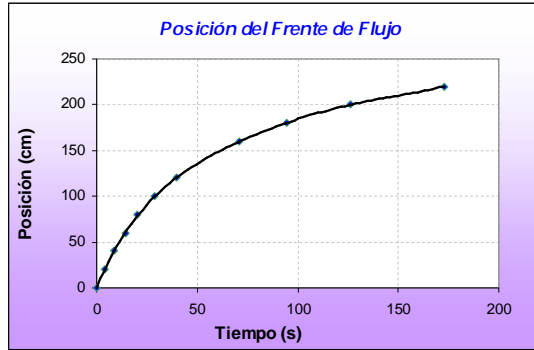


Figura 61.- Posición del frente de flujo para el mat de 150 g/m²

En la figura 62 se muestra la representación gráfica del cálculo de la permeabilidad flexible elemental, interpolada y de único punto para el mat de 150 g/m², realizada por el propio software de adquisición de datos Polyper®.

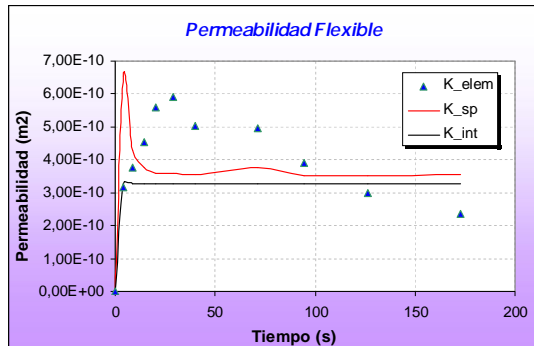


Figura 62.- Permeabilidad flexible para el mat de 150 g/m²

En la tabla 12 se muestran los resultados de las tres determinaciones de permeabilidad flexible interpolada para el mat de 150 g/m².

Tabla 13.- Resultados obtenidos para el mat de 150 g/m²

| Ensayo | K _{FLEX} (10 ⁻¹⁰ m ²) |
|--------|---|
| 1 | 4.52 |
| 2 | 4.57 |
| 3 | 5.15 |
| 4 | 7.30 |
| 5 | 2.53 |

Mat de Hilos Continuos (CFM) de 450 g/m²

El mat de hilos continuos de fibra de vidrio de 450 g/m² se utiliza generalmente para obtener espesores de pieza superiores a los que ofrece el mat de 150 g/m². Se trata de un tejido de espesor superior pero de configuración de las fibras idénticas. Se trata, por tanto, de una configuración de hilos al azar que, una vez impregnada y polimerizada la resina, da piezas de propiedades mecánicas casi isotrópicas en el plano.

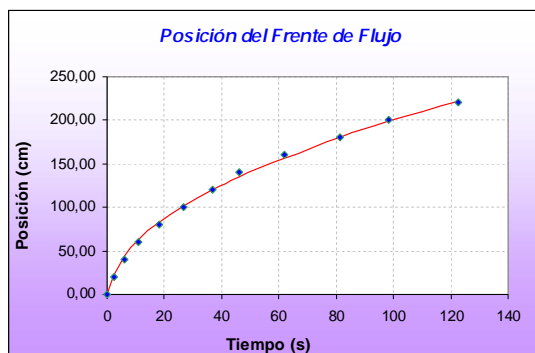


Figura 63.- Posición del frente de flujo para el mat de 450 g/m²

A modo de ejemplo, en la figura 63 se muestra el avance del frente de flujo con el tiempo en el transcurso de la experiencia.

En la figura 64 se muestra la representación gráfica del cálculo de la permeabilidad flexible elemental, interpolada y de único punto para el mat de 450 g/m².

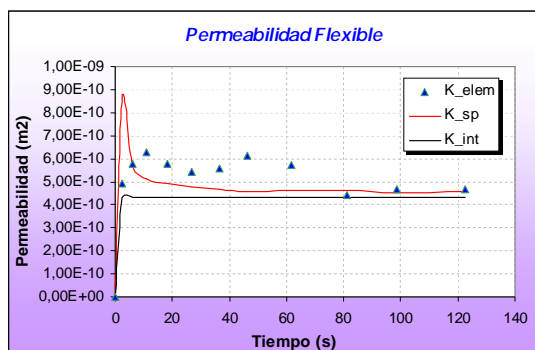


Figura 64.- Permeabilidad flexible para el mat de 450 g/m²

En la tabla 14 se muestran los resultados de las tres determinaciones de permeabilidad flexible interpolada para el mat de 450 g/m².

Tabla 14.- Resultados obtenidos para el mat de 450 g/m²

| Ensayo | K _{FLEX} (10 ⁻¹⁰ m ²) |
|--------|---|
| 1 | 5.26 |
| 2 | 5.52 |
| 3 | 5.73 |
| 4 | 5.43 |
| 5 | 5.97 |

Tafetán 0/90 de fibra de vidrio.

El tejido 0/90 en forma de tafetán tiene una densidad superficial nominal de 402 g/m². Dado que todas las fibras están dispuestas bien en urdimbre o bien en trama, la resistencia máxima de este tejido se da, de forma

prácticamente idéntica (con la diferencia de una ligera mayoración en urdimbre (54/46%)), en dirección 0° y 90° de fabricación. La permeabilidad de este tipo de tejidos es prácticamente idéntica en ambas direcciones, pero diferente en cualquier otra dirección, siendo necesaria la determinación del tensor completo de permeabilidad para realizar simulaciones del llenado de molde. Por lo tanto, se ha determinado la permeabilidad en las direcciones de 0° y 45° .

En la tabla 15 se muestran los resultados de las tres determinaciones de permeabilidad flexible interpolada para el tejido 0/90.

Tabla 15.- Resultados obtenidos para el tejido 0/90

| Ensayo | $K_{\text{FLEX}} (10^{-10} \text{ m}^2)$ en 0° | $K_{\text{FLEX}} (10^{-10} \text{ m}^2)$ en 45° |
|----------|---|--|
| 1 | 2.33 | 3.620 |
| 2 | 3.31 | 3.625 |
| 3 | 2.89 | 3.384 |
| 4 | 2.32 | |
| 5 | 2.31 | |

Tafetán 0/90 de fibra de yute.

El tafetán de fibra de yute empleado tiene una densidad superficial nominal de 360 g/m^2 . Se trata de un tejido equilibrado con 5.8 hilos/cm tanto en la dirección de la urdimbre como en la de trama. En concreto, el título del hilo empleado para su fabricación es de 300 tex.

De forma similar al tafetán de vidrio, dado que se trata de un tejido con estructura muy similar tanto en urdimbre como en trama, son de esperar valores de permeabilidad muy similares en las direcciones 0° y 90° . En la tabla 15 se muestran los resultados de las tres determinaciones de permeabilidad flexible interpolada para el tejido 0/90.

Tabla 16.- Resultados obtenidos para el tejido de yute

| Ensayo | $K_{\text{FLEX}} (10^{-10} \text{ m}^2)$ en 0° | $K_{\text{FLEX}} (10^{-10} \text{ m}^2)$ en 45° | $K_{\text{FLEX}} (10^{-10} \text{ m}^2)$ en 90° |
|--------|---|--|--|
| 1 | 6.99 | 5.32 | 7.15 |
| 2 | 6.54 | 6.84 | 8.03 |
| 3 | 6.70 | 7.01 | 6.93 |
| 4 | 6.46 | 6.83 | 6.94 |
| 5 | 6.66 | 6.04 | 8.67 |

Dentro de la familia de los tejidos empleados generalmente en procesos con vacío se ha determinado la permeabilidad flexible de dos diferentes tipos de refuerzos:

1. Rovicore® 450-D3-450
2. Mateglass® Pro1

Tabla 17.- Características de tejidos caracterizados (tipicos VARTM)

| Referencia | Rovicore® 450-D3-450 | Mateglass® Pro1 |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Arquitectura | | |
| Capa 1 | Mat 450 (g/m ²) | Mat 150 (g/m ²) |
| Capa 2 | Núcleo 180 (g/m ²) (1 mm) | Woven Roving 300 (g/m ²) |
| Capa 3 | Mat 450 (g/m ²) | Núcleo 100 (g/m ²) (1 mm) |
| Capa 4 | | Biaxial ±45 450 (g/m ²) |
| Gramaje nominal (g/m²) | 1090 (g/m ²) | 1000 (g/m ²) |
| Material | Fibra de vidrio E | Fibra de vidrio E |
| Fracción volumétrica vidrio | n/d | 0.26 |

Rovicore® 450-D3-450

Rovicore® 450-D3-450 es el nombre comercial de un tejido híbrido de la marca francesa Chomarar formado por la combinación de dos pieles de

fibra de vidrio en forma de mat de hilos cortados de 450 g/m^2 y un núcleo de cloruro de polivinilo (PVC) espumado de 180 g/m^2 . Los componentes del sándwich son cosidos entre sí y suministrados en forma de bobina. Dado que está compuesto por tejidos con fibras orientadas al azar, se considera que la permeabilidad del conjunto no depende de la dirección del plano.

Existen en el mercado diversos tejidos tipo sándwich que persiguen los mismos objetivos:

1. Conseguir una alta permeabilidad al paso de la resina.
2. Ser fácilmente conformables para reducir los tiempos de trabajo manual sobre el molde.
3. Ofrecer productos finales con propiedades mecánicas aceptables.

Estos tejidos son los que han encontrado una mayor aceptación en la tecnología de los procesos de transferencia de resina con vacío por dos razones fundamentales:

1. Su permeabilidad, como se verá posteriormente, es sensiblemente superior a los refuerzos tradicionales.
2. La compresibilidad del núcleo espumado permite la utilización del mismo tejido en un amplio rango de espesores (en este caso desde 2 mm hasta 4 mm).

De forma similar a las experiencias anteriores, se ha realizado la determinación de la permeabilidad flexible del Rovicore[®] en el banco desarrollado en el presente trabajo. En la figura 65 se muestra el avance del frente de flujo con el tiempo en el transcurso de la experiencia:

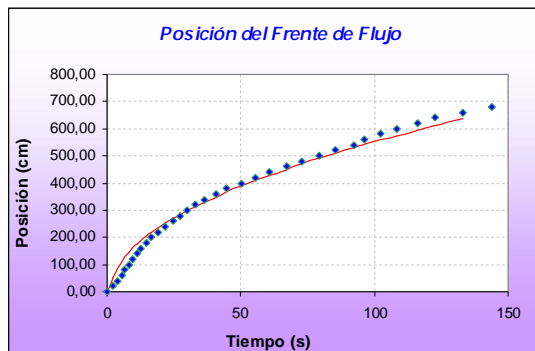


Figura 65.- Posición del frente de flujo para el Rovicore® 450-D3-450

En la tabla 18 se muestran los resultados de las determinaciones de permeabilidad flexible interpolada para el Rovicore® 450-D3-450.

Tabla 19.- Permeabilidad flexible del Rovicore® 450-D3-450

| Ensayo | $K_{\text{FLEX}} (10^{-10} \text{ m}^2)$ |
|--------|--|
| 1 | 29.8 |
| 2 | 26.8 |
| 3 | 28.2 |
| 4 | 27.4 |
| 5 | 28.9 |

Mateglass® Pro 1

De forma similar al Rovicore®, el Mateglass® Pro 1 es el nombre comercial de un tejido híbrido en forma de sándwich creado específicamente para procesos de transferencia de resina con vacío. Este tejido contiene un núcleo que aumenta considerablemente la permeabilidad del mismo. Una capa de Mateglass® Pro 1 contiene, Mat, Woven Roving, un núcleo y una capa de tejido multiaxial $\pm 45^\circ$

En la figura 66 se muestra el avance del frente de flujo con el tiempo en el transcurso de una de las experiencias:

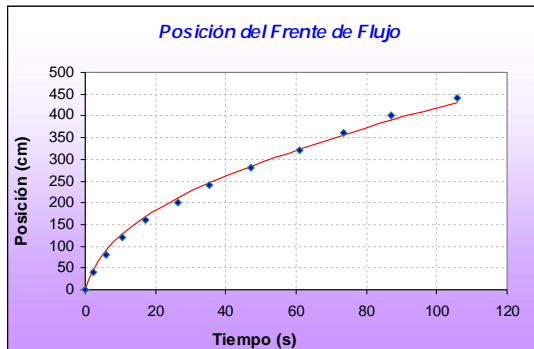


Figura 67.- Posición del frente de flujo para el Mateglass® Pro 1

En la tabla 20 se muestran los resultados de las determinaciones de permeabilidad flexible interpolada para el Mateglass® Pro 1

Tabla 21.- Resultados obtenidos para el Mateglass® Pro 1

| Ensayo | $K_{\text{FLEX}} (10^{-10} \text{ m}^2)$ |
|--------|--|
| 1 | 24.59 |
| 2 | 22.68 |
| 3 | 24.18 |
| 4 | 29.68 |
| 5 | 21.52 |

En la tabla 22 se muestran los resultados obtenidos para los tejidos caracterizados.

Tabla 22.- Permeabilidad flexible interpolada de los distintos tejidos caracterizados

| Tejido | Dirección | $K_{\text{FLEX}} (10^{-10} \text{ m}^2)$ |
|--------------------------------|-----------|--|
| Mat 150 g/m² | | 4.81±1.71 (35.5%) |
| Mat 450 g/m² | | 5.64±0.29 (5.2%) |
| Tafetán fibra vidrio | 0 | 2.64±0.45 (17.2%) |
| | 45 | 3.07±0.68 (22.2%) |
| Tafetán fibra yute | 0 | 6.67±0.20 (22.0%) |
| | 45 | 6.41±0.72 (10.9%) |
| | 90 | 7.54±0.77 (10.0%) |
| Rovicore® 450-D3-450 | | 28.2±1.19 (4.2%) |
| Mateglass® Pro 1 | | 24.5±3.10 (12.8%) |

4.3.- Sensores de Flujo de Calor. Experimental

Se han desarrollado dos experimentos en planta piloto utilizando el dispositivo detallado en el apartado 3.1. Los objetivos de la experimentación son los siguientes:

1. Conseguir la validación práctica del equipo de adquisición mediante la instalación de una serie de sensores en un molde perteneciente a un proceso industrial.
2. Configurar el software necesario para la adquisición de datos y comprobar su utilidad.
3. Analizar los resultados utilizando el propio software de adquisición, de tal forma que se exploten las potencialidades del mismo.
4. Estudiar las ventajas de este tipo de sensores, frente a otras tecnologías.

En la tabla 23 se muestran la características principales del experimental llevado a cabo.

Tabla 23.- Experimental

| EXPERIMENTO | 1 | 2 |
|--------------------|---|---|
| FIBRA | Rovicore 200/D3/200 | Rovicore 200/D3/200 |
| RESINA | Resina Poliéster insaturada "Norsodyne 5100 – 40" | Resina Viniléster "DERAKANE MOMENTUM 411-350" |
| CATALIZADOR | 2% P MEC; 0.05% OcCo (6%) | 1.5% P MEC; 0.15% OcCo |
| MODO | Caudal CTE | Caudal CTE |
| SENSORES | 1 (Inyección) | 2 (Inyección + Aspiración) |

4.3.1.- Inyección con sistema catalítico de baja reactividad.

La primera experiencia se ha realizado con un sistema catalítico que ofrece una baja velocidad de reacción. En este caso, la reacción de polimerización es muy lenta y, por lo tanto, la exotermia de reacción es reducida. Se trata de observar la diferencia entre el comportamiento de la temperatura del

molde y el calor generado por la exotermia de la reacción. En este primer experimento tan solo se han tomado datos del sensor de calor que se encuentra más cercano al punto de inyección.

En la figura 68 se muestran distintos momentos del proceso de inyección de la resina.



Figura 68.- Pruebas en planta piloto

Los resultados obtenidos en la adquisición de datos han sido exportados a un fichero de texto y posteriormente han sido importados a una hoja de cálculo. La representación gráfica de los resultados se muestra en la figura 69.

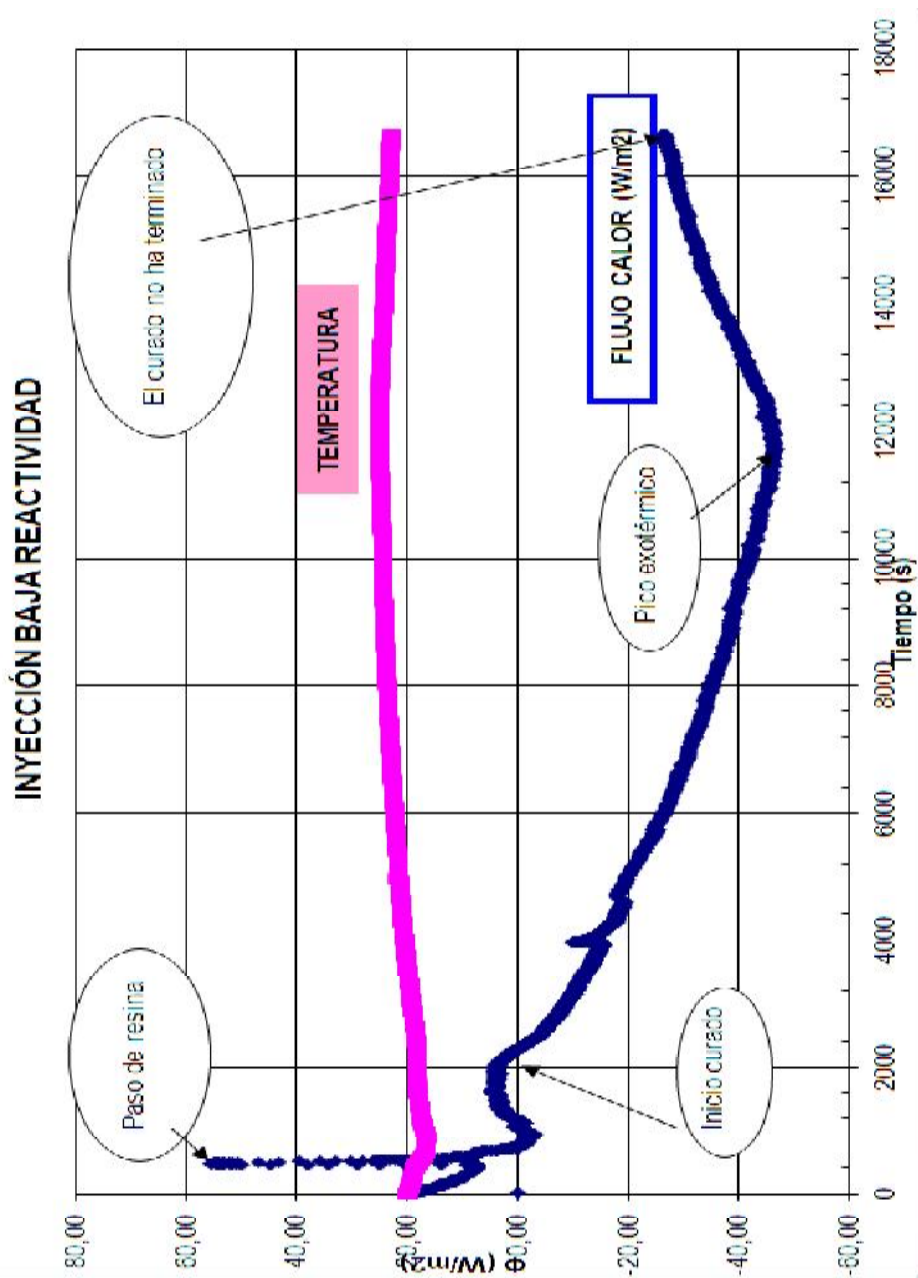


Figura 69.- Ensayo de baja reactividad

Los puntos representativos de los resultados obtenidos son los siguientes:

1. **Paso de resina:** cuando se inyecta la resina en la cavidad del molde y ésta alcanza el punto donde se sitúa el sensor, se produce un intercambio de calor debido a la diferencia de temperatura entre la resina y el molde. Este hecho produce perturbaciones en el gráfico hasta que vuelve a alcanzarse el equilibrio térmico.
2. **Inicio curado:** el inicio de la reacción queda patente por el comienzo de la tendencia exotérmica del gráfico de flujo de calor.
3. **Pico exotérmico:** la velocidad de reacción de polimerización es máxima en el pico observado en el gráfico.
4. **El curado no ha terminado:** como la velocidad de reacción es muy reducida, el curado no ha terminado 4,6 h después del inicio del experimento.

Si se compara la línea de flujo de calor con el de temperatura, se observa que la primera muestra mayor sensibilidad a los cambios que ocurren en el ciclo de fabricación. Puede definirse un indicador que cuantifique la sensibilidad de cada tipo de medida. De esta manera se define el **cociente de sensibilidad, S** como:

$$S = \frac{W_{\max} - W_{\min}}{|W_{\min}|} \quad (31)$$

donde W_{\max} es el valor máximo registrado para un parámetro y W_{\min} es el valor mínimo.

Para el caso de **temperatura**, el valor de sensibilidad $S_T = 0.5$

Para el **flujo de calor**, el valor de sensibilidad $S_F = 3.45$

En este último caso no se han tenido en cuenta las perturbaciones térmicas que suponen incrementos momentáneos de procesos de transferencia de calor.

4.3.2.- Inyección con sistema catalítico de moderada reactividad.

Se ha realizado una segunda inyección de resina en cavidad con el mismo molde y refuerzo, pero esta vez se han implementado dos conjuntos de sensores termopar / flujo de calor.

El primer conjunto se encuentra situado cerca del punto de inyección (en la misma posición que en el primer experimento) mientras que el segundo conjunto de sensores se encuentra cerca del punto de vacío de cavidad del molde. Se presenta a continuación el gráfico obtenido directamente con el software aDDa-v, si bien es posible exportar dichos datos a una hoja de cálculo de manera similar a la experiencia anterior (figura 70).

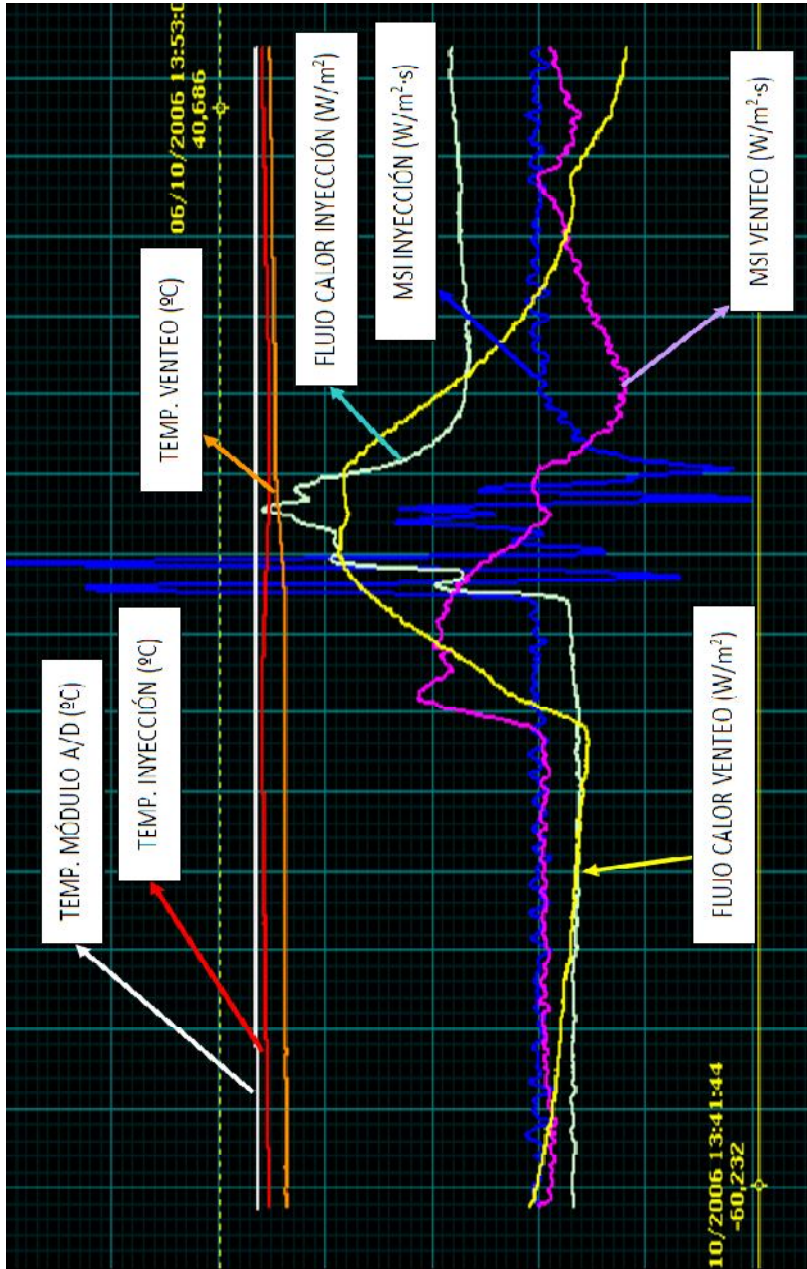


Figura 70.- Ensayo de moderada reactividad

En la figura 70 se dispone de mayor información que en la figura 69. Esto último se debe fundamentalmente a que:

1. No sólo se muestran las medidas de dos conjuntos de sensores termopar / flujo de calor, sino que además se ha representado para cada sensor el *indicador del estado del material*.
2. La reactividad de la resina es mucho mayor, por lo que los cambios en las curvas de flujo de calor (y por ello del MSI) son mucho más acusados en la figura 70.

Como puede observarse en la figura 70, todo el experimento tiene lugar en poco más de 10 minutos, lo que nos da una idea de la reactividad del sistema catalítico seleccionado. En el experimento previo, la reacción se prolongó durante algo más de 5 horas.

Existen tres termopares en el dispositivo experimental, que registran lo siguiente:

Línea blanca: corresponde al termopar que tiene incorporado uno de los módulos de conversión analógico/digital. Dado que este módulo se encuentra completamente aislado del propio molde donde tiene lugar la reacción de polimerización, no es sensible a la misma, permaneciendo prácticamente constante a lo largo de todo el experimento. Se aprecia, no obstante una ligera subida debido al cambio de la temperatura ambiente.

Línea roja: corresponde al termopar cercano al punto de inyección de la resina. La temperatura inicial es de 24°C y al final de la reacción de polimerización se sitúa en torno a los 27°C. Observamos un cambio de tendencia al alza que coincide con el inicio de reacción de polimerización.

Línea naranja: corresponde al termopar cercano al punto de aspiración. La temperatura inicial es de 23°C y al final de la reacción de polimerización se sitúa en torno a los 27°C. Esta línea discurre prácticamente paralela a la anterior.

Existen 4 curvas directamente relacionadas con la medida de flujo de calor: dos de ellas representan la transferencia de calor en sendos sensores (situados junto a la inyección y a la aspiración respectivamente) y las dos restantes representan la derivada con el tiempo de dichas curvas (MSI). De esta manera:

Línea azul claro: Representa el flujo de calor en la inyección. Se observa en dicha línea como las perturbaciones térmicas comienzan por la detección del alcance de la resina y, casi inmediatamente, se produce la generación de calor debido a la exotermia de la reacción, cuyo pico se alcanza pocos minutos después.

Línea amarilla: correspondiente a las medidas de flujo de calor cerca del venteo (aspiración), se observa cómo las perturbaciones térmicas tienen lugar antes que en el caso del sensor cercano a la inyección.

Línea azul oscuro: es la representación del *Indicador de estado de material* para el caso del sensor cercano a la inyección. Dado que esta línea representa la variación del flujo de calor con el tiempo, es muy sensible a las variaciones bruscas de la temperatura correspondiente (la línea azul claro). Con este tipo de representación se puede determinar con gran precisión el inicio y final de reacción de polimerización, lo que permite optimizar el sistema catalítico y el tiempo de ciclo.

Línea rosa: representa el MSI adquirido con el sensor cercano a la aspiración. De forma análoga al caso anterior nos permitiría realizar la optimización del proceso, desde un punto de vista industrial.

Destaca la diferencia de comportamiento entre las gráficas de temperatura y las relacionadas con flujo de calor, más sensibles que las primeras a los cambios en la cavidad del molde.

4.3.3.- Conclusiones sobre el empleo de sensores de flujo de calor.

Ensayo de baja reactividad.

Aunque existe una gran diferencia de sensibilidades para el caso de termopares y sensores de flujo de calor, debido a la baja reactividad de la resina no se aprecia una ventaja fundamental que justifique la inversión en sensores de flujo de calor. La instalación de termopares puede ser suficiente para una correcta monitorización del proceso de curado. No obstante, este supuesto de baja reactividad no suele darse en la industria de transformación de materiales compuestos, ya que el tiempo transcurrido desde el completo llenado de la cavidad hasta el inicio de la gelificación debe ser mínimo para optimizar económicamente el proceso.

Ensayo de moderada reactividad.

La primera conclusión que se puede extraer es la gran diferencia que existe entre el cociente de sensibilidad para la temperatura y para el flujo de calor. En la tabla 24, se resumen los resultados del cálculo de dicho cociente:

Tabla 24.- Sensibilidad en ensayo de moderada reactividad

| Sensor | Wmax | Wmin | S |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|
| Termopar Inyección | 27.7 °C | 23.6 °C | 0.17 |
| Flujo Calor Inyección | 54.5 W/m ² | -18.3 W/m ² | 3.98 |
| Termopar Aspiración | 26.6 | 23.3 | 0.14 |
| Flujo Calor Aspiración | 51.7 W/m ² | - 78.4 W/m ² | 2.51 |

Dada la alta sensibilidad a los cambios entálpicos del material, el empleo de este tipo de sensores permite optimizar el proceso desde el punto de vista industrial, obteniendo piezas de alta calidad en el mínimo tiempo. Para series medias, este tipo de sensores permitiría optimizar:

1. El **sistema catalítico**, ya que es posible reducir el tiempo de inicio de reacción hasta el momento en que la resina haya rellenado por completo la cavidad.
2. El **tiempo de ciclo**, ya que permite el desmoldeo de la pieza en el momento justo en que la velocidad de reacción es prácticamente nula (pieza terminada).

Por lo tanto, la inclusión de sensores de flujo de calor en los moldes de VARTM permitiría:

1. Reducir el tiempo de ciclo de fabricación de la pieza, puesto que ayudan en la formulación del sistema catalítico y en la selección del momento óptimo de desmoldeo de la pieza.
2. Conocer la posición del frente de flujo, lo que habilita la toma de decisiones de control que posibiliten un correcto llenado del molde, reduciendo las diferencias entre la simulación y la inyección real de la pieza.

4.4. - La simulación del llenado frente a la inyección en planta piloto

El presente apartado tiene como objetivo la comparación de los resultados experimentales de las inyecciones realizadas en frente a los resultados correspondientes a las simulaciones realizadas. Para la realización de dichas simulaciones se han tratado de reproducir, las condiciones de contorno existentes en el momento de la prueba experimental, principalmente:

- 1) Gradiente de presión. Se corresponde con la diferencia entre el nivel de vacío alcanzado en la trampa y la presión atmosférica.
- 2) Viscosidad de la resina. Tomada como variable con el tiempo según el sistema catalítico empleado tal como se muestra en la figura 59.
- 3) Permeabilidad de la preforma. En el caso de isotropía en el plano se utiliza un único valor de permeabilidad K_1 , mientras que en el caso de anisotropía se tienen en cuenta los valores K_1 , K_2 y el ángulo (θ) formado entre la dirección geométrica principal de la preforma y la correspondiente a la dirección principal de permeabilidad K_1 .
- 4) Punto de inyección. Se coloca el punto de inyección sobre la zona de alta permeabilidad mostrada en la figura 58.

Una vez descrito el sistema, se realiza la simulación. El post-procesador del *software* utilizado permite obtener gráficamente la evolución de las variables de proceso con el tiempo. De esta manera, es posible comparar la evolución del llenado de la cavidad con el tiempo correspondiente a la simulación con una serie de fotografías tomadas en planta piloto que muestran la evolución del llenado.

Se muestra a continuación gráficamente los resultados obtenidos en las diferentes experiencias en planta piloto frente a las simulaciones realizadas.

4.4.1.- Mat de fibra de vidrio de 150 g/m².


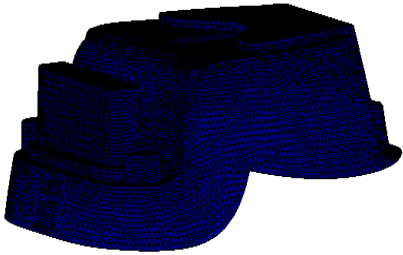

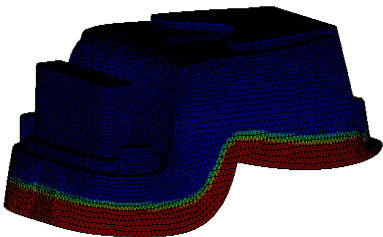
Se ha llevado a cabo en primer lugar una experiencia con el mat de fibra de vidrio de 150 g/m², en la que se han considerado las condiciones de contorno mostradas en la tabla 25:


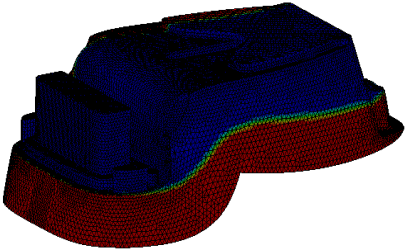

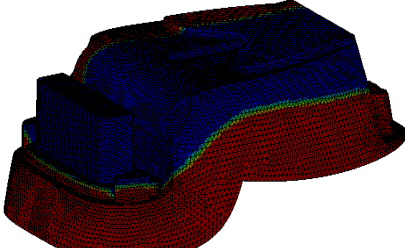
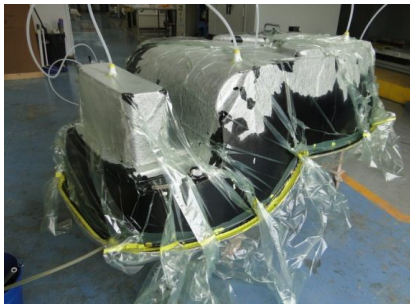
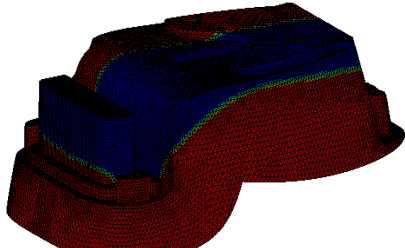

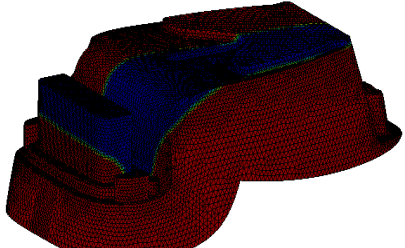
Tabla 25.- Condiciones de contorno para la simulación del mat de fibra de vidrio


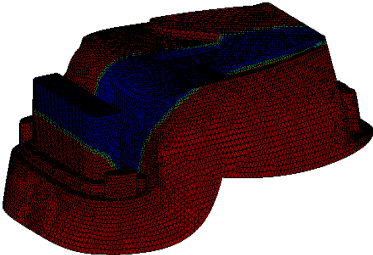

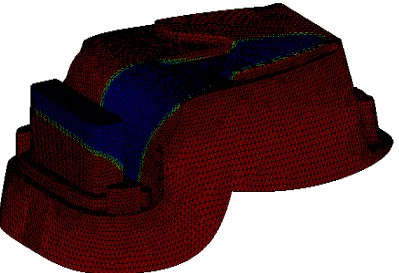

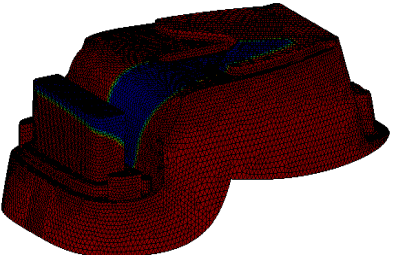
| | |
|------------------------------|---|
| Viscosidad de la resina | Correspondiente al sistema catalítico 2 (Tabla 9) |
| Gradiente de presión | $5 \cdot 10^4$ Pa |
| Permeabilidad de la preforma | $4.81 \cdot 10^{-10}$ m ² (Tabla 22) |

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 26

Tabla 26.- Resultados Mat de fibra de vidrio 150 g/m²

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 0 |  |  |
| 1 |  |  |

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 2 |  |  |
| 5 |  |  |
| 8 |  |  |
| 10 |  |  |

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|--|---|
| 12 |  |  |
| 15 |  |  |
| 20 |  |  |

Los resultados obtenidos muestran cómo la simulación reproduce apropiadamente la evolución del frente de flujo durante la experiencia completa. Existe sin embargo un fuente importante de variación debida al flujo de la resina a través de las irregularidades producidas en la bolsa al aplicar el vacío; irregularidades que no son tenidas en cuenta en el modelo de la simulación. La reducida permeabilidad del mat permite que el efecto mencionado cobre mayor importancia.


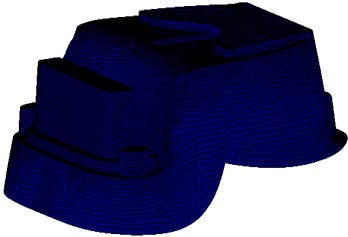

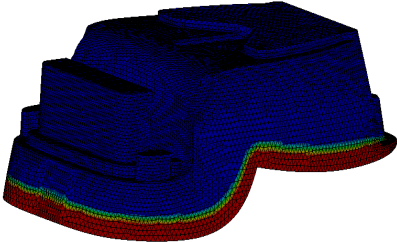
4.4.2.- Tafetán de fibra de vidrio.


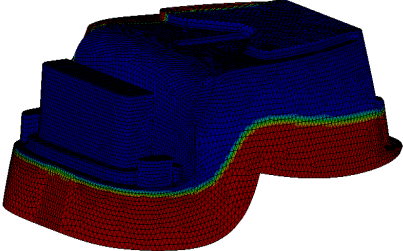

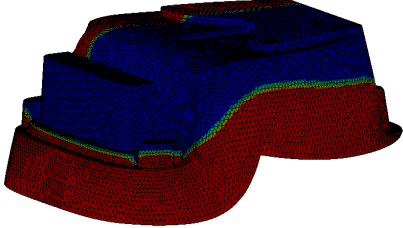

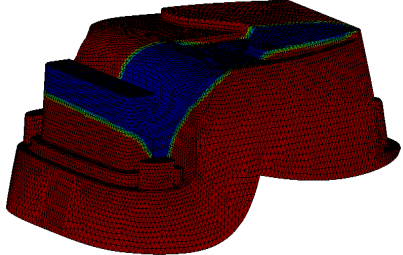

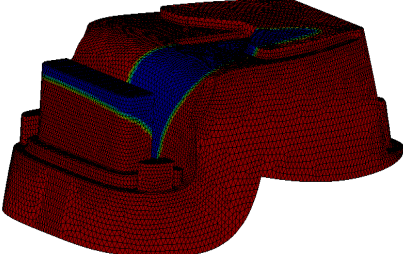
De forma similar al mat de fibra de vidrio de 150 g/m^2 , se han comprobado experimentalmente los resultados de la simulación del tejido de fibra de vidrio en la que se han considerado las condiciones de contorno mostradas en la tabla 27:


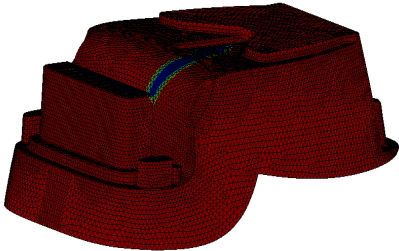

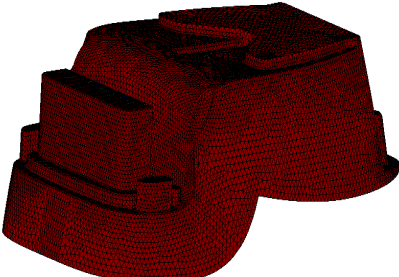

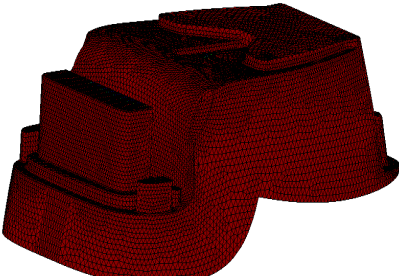

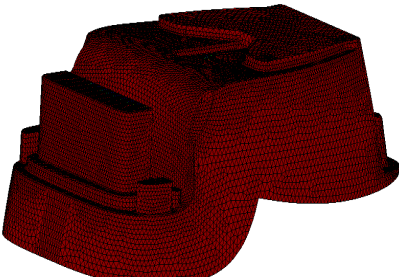
Tabla 27.- Condiciones de contorno para la simulación del tafetán de fibra de vidrio

| Viscosidad de la resina | Correspondiente al sistema catalítico 2 (Tabla 9) |
|------------------------------|---|
| Gradiente de presión | $5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ |
| Permeabilidad de la preforma | $K_1 = 3.07 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ $K_2 = 2.64 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ $\Theta = 45^\circ$ |

Tabla 28.- Resultados Tafetán de fibra de vidrio

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 0 |  |  |
| 1 |  |  |

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 2 |  |  |
| 5 |  |  |
| 15 |  |  |
| 20 |  |  |

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 30 |  |  |
| 40 |  |  |
| 50 |  |  |
| 60 |  |  |

En el caso del tejido bidireccional de fibra de vidrio, con permeabilidad también muy reducida, queda de nuevo patente la modificación del flujo

debido a las irregularidades de la bolsa de vacío. Además se observa cómo el tiempo de llenado predicho por la simulación es sensiblemente inferior al obtenido experimentalmente.

4.4.3.- Tafetán de fibra de yute de 360 g/m².


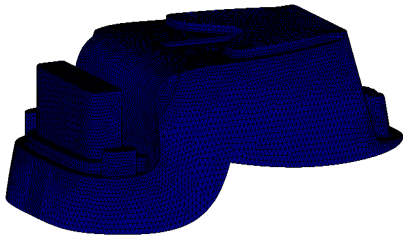
Se ha realizado un ejercicio similar para el caso de la fibra de yute. Con los valores de permeabilidad obtenidos experimentalmente, se ha realizado una simulación del proceso de infusión de resina que ha sido comprobada experimentalmente con las condiciones de contorno mostradas en la tabla 29:


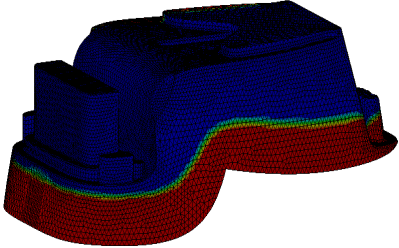

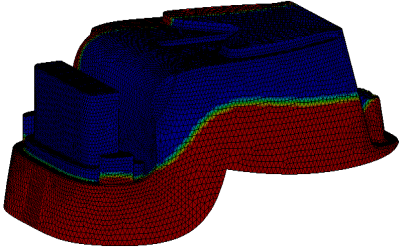

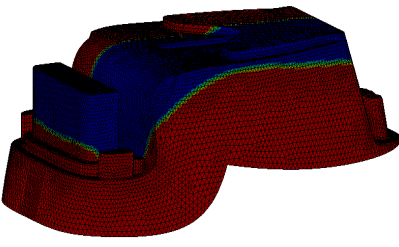

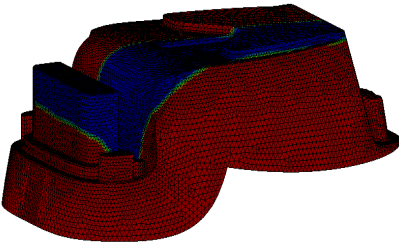
Tabla 29.- Condiciones de contorno para la simulación del tejido de yute


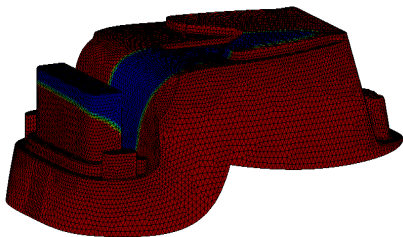

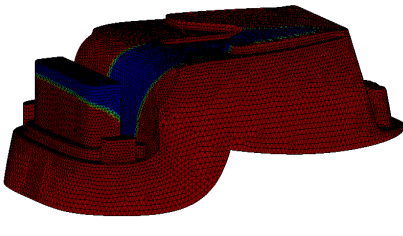

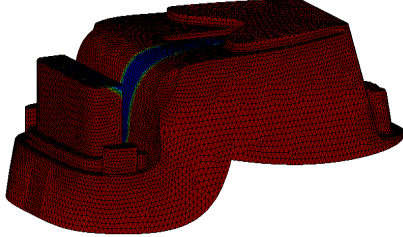

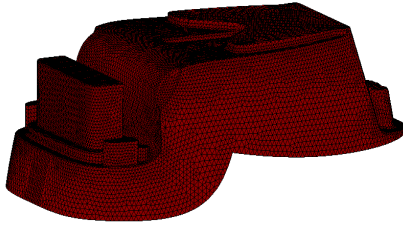
| | |
|------------------------------|--|
| Viscosidad de la resina | Correspondiente al sistema catalítico 1 (Tabla 9) |
| Gradiente de presión | $5 \cdot 10^4$ Pa |
| Permeabilidad de la preforma | $K_1 = 8.05 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ $K_2 = 6.31 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ $\Theta = 119.8^\circ$ |


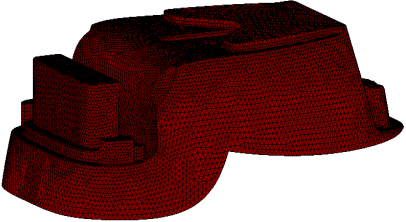

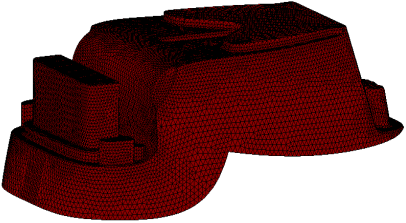
En la tabla 30 se compara el resultado de la simulación con el proceso de infusión en planta piloto

Tabla 30.- Resultados de la comparación con fibra de yute

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 0 |  |  |

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 5 |  |  |
| 7 |  |  |

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 10 |  |  |
| 12 |  |  |
| 15 |  |  |
| 20 |  |  |

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 25 |  |  |
| 30 |  |  |

La permeabilidad del tejido de yute es superior tanto a la del tejido como al mat de fibra de vidrio, característica que resulta en un menor tiempo necesario para la impregnación de la preforma. Esta característica hace que las irregularidades de la preforma no afecten prácticamente al flujo de resina y que se aprecie una correspondencia casi total de la evolución del frente de flujo entre la simulación y la experiencia en planta piloto. Sin embargo, el tiempo de llenado predicho por la simulación sigue siendo inferior al efectivamente obtenido en planta piloto.

4.4.4.- Tejido Híbrido Mateglas® Pro1.

Se ha realizado un ejercicio similar para el caso del tejido híbrido Mateglas® de 1000 g/m². El proceso es idéntico a los casos anteriores; con los valores de permeabilidad obtenidos experimentalmente se ha realizado una simulación del proceso de infusión de resina que ha sido comprobada


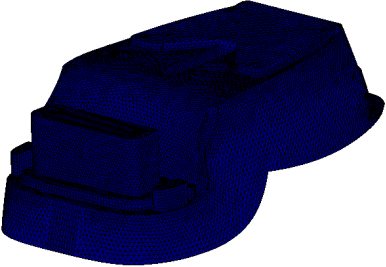

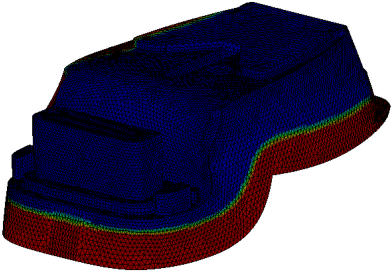
experimentalmente con las condiciones de contorno mostradas en la tabla 31:


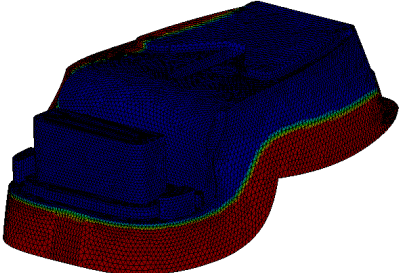

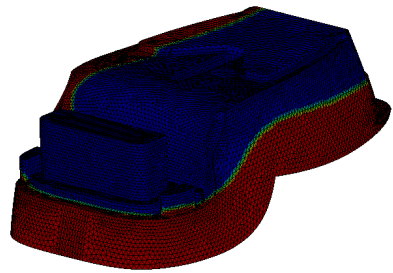

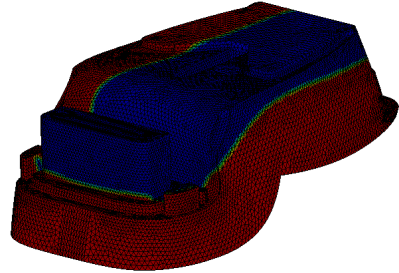

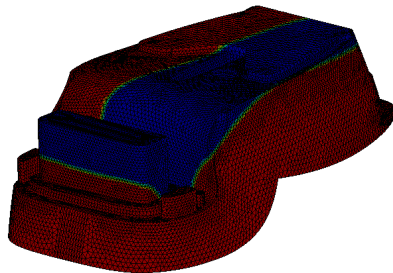
Tabla 31.- Condiciones de contorno para la simulación del tejido híbrido

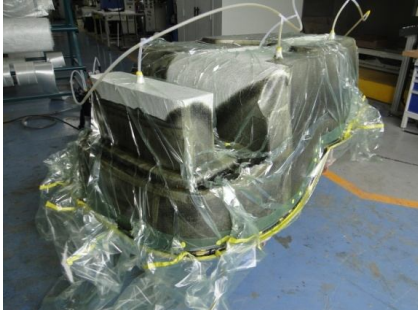
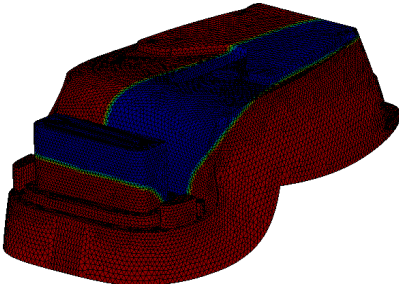

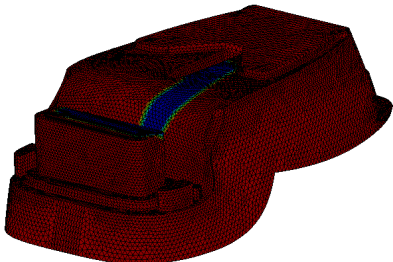
| | |
|-------------------------------------|--|
| Viscosidad de la resina | Correspondiente al sistema catalítico 1 (Tabla 9) |
| Gradiente de presión | $5 \cdot 10^4$ Pa |
| Permeabilidad de la preforma | $K = 24.5 \cdot 10^{-10}$ m ² |

En la tabla 32 se compara el resultado de la simulación con el proceso de infusión en planta piloto

Tabla 32.- Resultados de la comparación con el tejido híbrido

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|---------------------|---|--|
| 0 |  |  |
| 0.5 |  |  |

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 4 |  |  |
| 6 |  |  |

| Tiempo (min) | Planta Piloto | Simulación |
|--------------|---|--|
| 7 |  |  |
| 8 |  |  |

La alta permeabilidad del tejido híbrido permite el llenado más rápido de todas las experiencias llevadas a cabo. La influencia de las irregularidades de la bolsa es nula. Se aprecia nuevamente que el tiempo de llenado predicho en la simulación es algo inferior al observado en planta piloto.

4.4.5.- Conclusiones

El presente capítulo concluye con la validación de la metodología propuesta para la simulación de los procesos VARTM. Mediante una serie de experiencias en planta piloto ha sido posible comparar los resultados del prototipado virtual con modelos de *permeabilidad flexible* con el resultado del correspondiente proceso experimental. Los resultados se muestran la tabla 33

Tabla 33.- Resumen de resultados obtenidos en la validación experimental

| Exp. | Preforma | Resultado |
|------|-------------------------------|---|
| 1 | Mat de fibra de vidrio | <p>La simulación describe correctamente la evolución del frente de flujo. El tiempo obtenido en la simulación es menor que el experimental.</p> <p>Existe una fuente importante de variación debida al flujo de la resina a través de las irregularidades producidas en la bolsa al aplicar el vacío.</p> |

| Exp. | Preforma | Resultado |
|------|---------------------------------|--|
| 2 | Tafetán de fibra de vidrio | <p>La simulación describe correctamente la evolución del frente de flujo. El tiempo obtenido en la simulación es sensiblemente menor que el experimental.</p> <p>La diferencia entre el resultado de la simulación y la experiencia en planta piloto debida a las irregularidades en el conformado de la bolsa al aplicar el vacío cobra mayor importancia que en el caso anterior debido a la menor permeabilidad de la preforma.</p> |
| 3 | Tafetán de fibra de yute | <p>La simulación describe correctamente la evolución del frente de flujo. El tiempo obtenido en la simulación es sensiblemente menor que el experimental.</p> <p>Las irregularidades de la preforma no afectan prácticamente al flujo de resina debido a su mayor permeabilidad.</p> |

| Exp. | Preforma | Resultado |
|------|--|---|
| 4 | Tejido Híbrido Mateglas® Pro1 | <p>La simulación describe correctamente la evolución del frente de flujo. El tiempo obtenido en la simulación es menor que el experimental.</p> <p>Dado que el tejido híbrido presenta la permeabilidad más alta de todos los estudiados, el efecto de las irregularidades de la bolsa en el flujo es el menor de los observados.</p> |

Capítulo 5.- Conclusiones y Trabajos Futuros

5.1.- Conclusiones

La simulación de los procesos LCM permite aumentar la competitividad de los productos fabricados con dicha tecnología. Es una herramienta para la reducción de los costes derivados de la fabricación de útiles y permite la optimización de los tiempos de ciclo, así como la reducción del rechazo y el ahorro de materias primas.

Para simular el proceso es necesario caracterizar las materias primas utilizadas. En los últimos años, se ha hecho un gran esfuerzo en la estandarización de los métodos de medida de permeabilidad de los refuerzos textiles, aunque no existe un método que haya demostrado repetitividad suficiente.

En los procesos con ayuda de vacío (VARTM), la simulación es más compleja, debido al acoplamiento de la permeabilidad con el campo de presiones en cavidad, la presión de compactación en cada punto y el espesor. Las estrategias posibles requieren de gran potencia de cálculo y esfuerzo en la determinación del tensor completo de permeabilidad y su variación con el campo de presiones. Si además existen núcleos en la arquitectura del laminado, circunstancia muy común en los productos

fabricados mediante VARTM, la modelización del proceso se complica, de tal modo que se pierden las ventajas de la simulación por el esfuerzo necesario para obtener resultados útiles.

A la vista de los resultados del presente trabajo, se concluye que:

1.a.- La simulación de los procesos de transferencia de resina con ayuda de vacío se ha mostrado como una herramienta válida para el desarrollo de prototipos virtuales que permitan llevar a cabo el diseño del molde y el posicionamiento de sus puntos característicos, principalmente puntos de inyección y vacío, de tal forma que se asegure el llenado del mismo en el tiempo mínimo y de forma completa sin incurrir en defectos típicos tales como las zonas secas.

1.b.- El empleo de tecnologías útiles para el control de los procesos de transferencia de resina con ayuda de vacío puede mejorar la competitividad de los productos fabricados. En el presente trabajo se han investigado las tecnologías disponibles en la actualidad y se han probado los *sensores de flujo de calor* como una herramienta para la reducción del tiempo de ciclo en la fabricación de composites por infusión, el aseguramiento del llenado de cavidad y la posibilidad de poner en marcha estrategias de inyección complejas. El espesor del laminado se ha mostrado como un parámetro clave para la elección de este tipo de tecnología.

2.- En el presente trabajo se ha diseñado, construido y puesto en marcha un dispositivo experimental para la caracterización de la *permeabilidad flexible* de los refuerzos utilizados en la tecnología de transformación de materiales compuestos. La principal motivación para este desarrollo es la reducción del esfuerzo necesario para la simulación, aún a costa de reducir la precisión, obteniendo un equilibrio óptimo entre el valor de los resultados obtenidos y el coste necesario para ello.

Se ha caracterizado la permeabilidad flexible de diversos tejidos utilizados de forma común en procesos VARTM. La variabilidad encontrada está en línea que la de otros métodos⁵⁶ actualmente en uso. La alta variabilidad de todos ellos refuerza más si cabe el empleo de métodos como el presentado en el presente trabajo.

3.- El sistema experto propuesto en el siguiente trabajo permite disponer del conocimiento necesario para el correcto diseño de molde y optimización del proceso con un coste de inversión (bajo coste computacional) y funcionamiento reducidos (bajo coste de caracterización de materias primas). Se ha demostrado, en base a la experimentación sobre banco de ensayos, que la estrategia propuesta en el presente trabajo resulta ser una solución óptima para la optimización de la fabricación por *infusión* de materiales compuestos.

5.2.- Trabajos futuros.

El presente trabajo permite ser optimistas en cuanto a su adecuación como proyecto de innovación a diferentes sectores de aplicación, entre los que destaca el sector transporte, eólico y náutico, además del sector de la automoción. Está prevista una ronda de contactos con diferentes empresas para comunicar los resultados obtenidos y analizar su implementación.

Además queda pendiente la validación del sistema de control que permita corregir las desviaciones en el flujo de resina frente a lo esperado en la simulación. Procesos de fabricación de piezas de grandes dimensiones (tales como cascos y mamparos de barco y palas eólicas) son los más indicados. Una pequeña desviación en el flujo de estas grandes piezas puede suponer la aparición de grandes zonas secas y/o la pérdida de gran cantidad de materias primas que sería posible evitar gracias al sistema de control.

En el ámbito del desarrollo del propio código de simulación, cabría incluir el efecto del radio de curvatura del molde que se ha introducido en el presente trabajo. La inclusión de núcleos en el laminado es práctica habitual para aumentar la rigidez de grandes piezas. La presencia de dichos núcleos influye en el flujo de resina, influencia que puede ser aproximada mediante el concepto de *permeabilidad flexible*.

Anexo I Fichas técnicas de sensores de flujo de calor y accesorios



aDDa-M-F
aDDa-M-F+T

Product number: 103.xx

aDDa-M-F+O
aDDa-M-F+T+O

- 1 heat flow measurement
 - 1 thermocouple measurement (+T)
 - 1 optocoupled output (+O)
 - 2 integrated regulators (+O)
 - 24 bits A/D conversion
- Derivative and zero functions integrated
 - Fast deployment
 - Parameters storage
 - Cables included



DESCRIPTION

aDDa-M electronic (aDvanced Data acquisition) developed by Thermoflux Technologies is built around a 24 bits A/D converter for heat flow and temperature conditioning. It also includes a microcontroller for communication and floating-point calculations.

PRODUCT SELECTION

| Product number | Product reference | Measurement | | | | |
|----------------|-------------------|-------------|--------------|---------------------|-----------|-------------|
| | | Heat flow | Thermocouple | Function | Regulator | Optocoupler |
| 103.01 | aDDa-M-F | 1 | - | Derivative and Zero | - | - |
| 103.81 | aDDa-M-F+O | 1 | - | Derivative and Zero | 2 | 1 |
| 103.03 | aDDa-M-F+T | 1 | 1 | Derivative and Zero | - | - |
| 103.83 | aDDa-M-F+T+O | 1 | 1 | Derivative and Zero | 2 | 1 |

SUPPLY AND COMMUNICATION

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

| Symbol | Parameter | Min | Typ | Max | Units |
|----------------|-------------------|-----|-----|------|-----------------|
| VCC | Operating voltage | 6.2 | 24 | 30.8 | V _{oc} |
| I _n | Supply current | | 15 | | mA |

- Protected against reverse voltage

COMMUNICATION

RS485 type, half duplex, with proper protocol.

| Symbol | Parameter | Min | Typ | Max | Units |
|-------------------|-----------------------------|------|--------|------|-------|
| B _{rate} | Transfer data rate | | 19'200 | | bps |
| Address | aDDa-M-F and aDDa-M-F+O | 0x10 | 0x11 | 0xEF | |
| Address | aDDa-M-F+T and aDDa-M-F+T+O | 0x10 | 0x12 | 0xEF | |

PIN CONFIGURATION FOR USB TYPE A STACKED

| Pin | Symbol | Parameter |
|--------|--------|---|
| 1 | VCC | Power supply |
| 2 | D- | RS485 differential communication, negative signal |
| 3 | D+ | RS485 differential communication, positive signal |
| 4 | GND | Ground |
| Screen | Earth | Screen continuity |





aDDa-M-F
aDDa-M-F+T

aDDa-M-F+O
aDDa-M-F+T+O

OPTOCOUPLED OUTPUT (+O)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Open collector type, npn

| Symbol | Parameter | Min | Typ | Max | Units |
|---------------|--|-----|------|-----|-----------|
| V_{iso1} | Breakdown voltage | | 1500 | | V_{rms} |
| V_{CE} | Open collector-emitter voltage | | | 30 | V_{DC} |
| I_C | Collector current | | 2.4 | 5 | mA |
| $V_{CE(sat)}$ | Closed collector-emitter voltage ($I_C = 0.5mA$) | | | 1 | V_{DC} |
| t_{rH} | Rise time($V_{CC} = 24V, R_L = 10k\Omega$) | | 70 | | μs |
| t_{fL} | Fall time($V_{CC} = 24V, R_L = 10k\Omega$) | | 70 | | μs |
| f | Output frequency | 1.8 | 50 | 7k | Hz |

PIN CONFIGURATION FOR PHOENIX MC 1.5/2-ST-3.5

| Pin | Symbol | Parameter |
|-----|--------|---|
| 1 | + | Collector. Wire 0.14..1.5 mm ² (AWG28..16) |
| 2 | - | Emitter. Wire 0.14..1.5 mm ² (AWG28..16) |



HEAT FLOW INPUT

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

| Symbol | Parameter | Min | Typ | Max | Units |
|----------------------|--------------------------------|-------|-----|-----|----------|
| R_{in} | Differential input resistance | 200k | | | Ω |
| V_{step} | Resolution | | 24 | | bits |
| noise _{rms} | RMS measurement noise | | 0.2 | | μV |
| noise _{pp} | Peak to peak measurement noise | | 1 | | μV |
| CMRR | Common Mode Rejection Ratio | | 100 | | dB |
| F_{sample} | Sample rate | 8.3 | 50 | | Hz |
| A_{in+} | Analogue input voltage | -0.03 | | 5 | V |
| $A_{in+}-A_{in-}$ | Differential input voltage | -2.5 | | 2.5 | V |
| CMA_{in} | Input common voltage | | 2.5 | | V |

PIN CONFIGURATION FOR LEMO FGG-0B.302

| Pin | Symbol | Parameter |
|--------|-----------|-----------------------------|
| 1 | F_{in+} | Positive differential input |
| 2 | F_{in-} | Negative differential input |
| Screen | Earth | Screen continuity |



THERMOCOUPLE INPUT (+T)

Adapted for J, K or T thermocouple measurement, following ITS-90 norm.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

| Symbol | Parameter | Min | Typ | Max | Units |
|----------------------|----------------------------------|-------|-----|-----|-------------|
| R_{in} | Differential input resistance | 200k | | | Ω |
| V_{step} | Resolution | | 24 | | bits |
| noise _{rms} | RMS measurement noise | | 0.2 | | μV |
| noise _{pp} | Peak to peak measurement noise | | 1 | | μV |
| CMRR | Common Mode Rejection Ratio | | 100 | | dB |
| F_{sample} | Sample rate | 0.5 | 2.5 | 8.3 | Hz |
| TC_{+TC} | Analogue input voltage | -0.03 | | 5 | V |
| $TC_{+}-TC_{-}$ | Differential input voltage | -2.5 | | 2.5 | V |
| CMA_{in} | Input common voltage | | 2.5 | | V |
| CJC _{Temp} | Cold junction compensation error | | 0.3 | | $^{\circ}C$ |



aDDa-M-F
aDDa-M-F+T

aDDa-M-F+O
aDDa-M-F+T+O

PIN CONFIGURATION FOR LEMO FGG-0B.303

| Pin | Symbol | Parameter |
|--------|-----------------|---|
| 1 | | Do not use |
| 2 | TC ₊ | Positive differential input (preferred) |
| 3 | TC ₋ | Negative differential input |
| Screen | Earth | Screen continuity |



INTERNAL FUNCTIONS

AUXILIARY MEASUREMENTS

2 other measurements are done in the module:

- Supply input voltage
- PCB temperature

MATHEMATIC FUNCTIONS

3 mathematic functions are done on heat flow measurements:

- Low-band filter
- Derivate
- Zero function

Each data can be read on the bus.

REGULATORS (+O)

2 regulators are implemented in the module. They can make internal or external regulation, as explained:

| Regulator | Output pin | Output type | | | |
|-----------|------------|-------------|-----|------|------|
| | | Internal | PWM | 50Hz | 60Hz |
| Opto | Opto | X | X | X | X |
| Int | | X | | | |

They can perform 3 types of functions:

- Constant output (slave from automat)
- Digital PID (local regulation)
- Hysteresis regulator (local regulation or event detection)

CROWDING

| Measurement side | Body | Bus side |
|--------------------------|------|--------------------------|
| aDDa-M-F, aDDa-M-F+O | | aDDa-M-F, aDDa-M-F+T |
| aDDa-M-F+T, aDDa-M-F+T+O | | aDDa-M-F+O, aDDa-M-F+T+O |

CONTENTS

- 1 aDDa-M-F(+T)(+O) module
- 1 USB cable type A-A of 0.3m
- 1 LEMO 3 pins jack for thermocouple input (only aDDa-M-F+T et aDDa-M-F+T+O)
- 1 Phoenix 2 pins jack for optocoupled output (only aDDa-M-F+O et aDDa-M-F+T+O)

Thermoflux Technologies SA reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.



Product number: 144.xxx

| | |
|---------|------------|
| Tfx-104 | Tfx-104-BT |
| Tfx-144 | Tfx-144-BT |

- **Conductive type HDFs®**
- **Operating temperature 135°C (-BT), 200°C (-104), 250°C (-144)**
- **Non opening in cavity**
- Fast deployment



UPDATE

Tfx-104 sensors are no more build and sold out. Tfx-144 sensors replace them.

DESCRIPTION

The flow deviation sensors are especially well suited to the thermal events which occur within the materials which are being processed.

One of their principal characteristics is that they do not need any opening in the moulding cavity: they are dismantlable at room temperature. No peculiar precision is required for implementation, contrary to the traditional pressure sensors.

These sensors deliver information that is proportional to the heat transfers, which occurs during exothermic or endothermic phenomena, as the material is being processed.

These sensors are able to detect the structural changes of the material.

THERMAL CHARACTERISTICS

| Symbol | Parameter | | Min | Typ | Max | Units |
|--------------------|-----------------------|------------------------|-----|-----|-------|------------------|
| T _{nom} | Operating temperature | Tfx-104-BT, Tfx-144-BT | | 135 | | °C |
| | | Tfx-104 | | 200 | | |
| | | Tfx-144 | | 250 | | |
| T _{pulse} | Maximum temperature | Tfx-104-BT, Tfx-144-BT | | 170 | | °C |
| | | Tfx-104 | | 250 | | |
| | | Tfx-144 | | 300 | | |
| ψ | Heat flow level | | ±1 | | ±100k | W/m ² |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

| Symbol | Parameter | Min | Typ | Max | Units |
|--------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|---------------------|
| R _{in} | Differential input resistance | | 20 | | Ω |
| V _{noise} | RMS measurement noise | | 0.1 | | μV _{RMS} |
| Sensi | Sensitivity | | -10 | | nV/W/m ² |
| BW | Bandwidth | | 1 | | Hz |
| V _{bol} | Output voltage | | 500 | | Vac |
| V _{nom} | Breakdown voltage | | ±1 | | mV |

PIN CONFIGURATION OF JACK: LEMO FGG-0B.302

| Pin | Symbol | Parameter |
|--------|------------------|-----------------------------|
| 1 | A _{in+} | Positive differential input |
| 2 | A _{in-} | Negative differential input |
| Screen | | Earth |



Anexo II Fichas técnicas de materiales empleados en el experimental

Synolite 7410-G-1

DSM 

Ficha Técnica

DSM Product

Naturaleza químico-física

Synolite 7410-G-1 es una resina de poliéster insaturado basada en ácido ortoftálico de baja viscosidad y preacelerada.

Principales aplicaciones

Synolite 7410-G-1 se recomienda para aplicaciones de inyección e infusión para la fabricación de laminados constructivos complejos de alto rendimiento. La resina puede ser utilizada en combinación con la mayoría de los diferentes tipos de mats de fibra en vidrio.

Principales propiedades

Synolite 7410-G-1 es una resina insaturada de poliéster de reactividad media con bajo calor exotérmico. Se pueden elaborar tanto laminados gruesos como finos, y la resina muestra un buen curado a través del laminado. Synolite 7410-G-1 muestra muy buena humectación de fibra y propiedades de impregnación.

Especificaciones del producto en el momento de entrega

| Propiedad | Intervalo | Unidad | TM |
|---|--------------|---------|------|
| Aspecto | transparente | - | 2265 |
| Viscosidad, Physica, 2 s-1, 23°C | 120 - 160 | mPa.s | 2013 |
| Contenido en sólidos, IR | 55 - 58 | % | 2033 |
| Tiempo de gel desde 25 hasta 35°C | 23 - 28 | minutos | 2625 |
| Tiempo de curado desde 25°C hasta pico exotérmico | 33 - 38 | minutos | 2625 |
| Temperatura máxima | 105 - 125 | °C | 2625 |

Observaciones

Medida de viscosidad: TM2013: spindle ZZ, 100 s-1 a 23°.

Condiciones de curado a 25°C, TM 2625:

2.0 g de Trigonox 44B en 100 g de resina.

Propiedades de la resina líquida (valores usuales)

| Propiedad | Valor | Unidad | TM |
|---|-------------|-------------------|------|
| Densidad, 20°C | aprox. 1100 | Kg/m ³ | 2160 |
| Índice de refracción, 23°C | 1.5443 | - | 2150 |
| Punto de inflamación | aprox. 33 | °C | 2800 |
| Índice de acidez | 31 | mg KOH/g | 2401 |
| Estabilidad, sin peróxidos, en la oscuridad, 25°C | 6 | meses | - |

Propiedades. Resina no cargada (valores usuales)

| Propiedad | Valor | Unidad | TM |
|--|-------|-------------------|-----------|
| Resistencia a la tracción | 70 | MPa | ISO 527-2 |
| Módulo de elasticidad (tracción) | 4.3 | GPa | ISO 527-2 |
| Alargamiento a la rotura | 2 | % | ISO 527-2 |
| Resistencia a la flexión | 110 | MPa | ISO 178 |
| Módulo de elasticidad (flexión) | 4.3 | GPa | ISO 178 |
| Alargamiento de las fibras limitrofes | 2.6 | % | ISO 178 |
| Resistencia al impacto - sin entalla | 10 | KJ/m ² | ISO 179 |
| Estabilidad dimensional al calor (HDT) | 63 | °C | ISO 75-A |
| Temperatura de transición vítrea (Tg) | 93 | °C | DIN 53445 |

Observaciones

Curado con 1 ml de MEKP-HA 2 (Peroxid-Chemie GmbH) añadidos a 100 g de resina. Curado 24 h a temperatura ambiente y poscurado 24 h a 80 °C.

Recomendaciones antes de uso

Antes de su uso, la resina debe ser acondicionada a una temperatura bien definida (normalmente a 15°C como mínimo).

Condiciones de almacenamiento

La resina debe ser almacenada en sus envases originales, no abiertos ni dañados, en un lugar cubierto y seco a temperaturas entre 5°C y 25°C. El tiempo de vida de la resina se ve reducido al altas temperaturas y las propiedades de la resina pueden cambiar durante el almacenamiento.

La estabilidad de las resinas de poliéster insaturado que contienen estireno se verá significativamente reducida si sufren exposición a la luz. Deben almacenarse en la oscuridad utilizando exclusivamente contenedores negros y completamente opacos.

Seguridad del material

La hoja de seguridad del producto, está disponible bajo petición.

Métodos de ensayo

Los métodos de ensayo (TM) citados en las tablas están disponibles bajo petición.

Versión: 014910/1.0
Fecha de edición: Mayo 2007

Oficina central: DSM Composite Resins AG, P.O. Box 1227, 8207 Schaffhausen, Suiza
Tel: (+41) (0)52 - 644 1212, Fax: (+41) (0)52 - 644 1200
Sitio de internet: www.dsmcompositeresins.com

Aunque los hechos y sugerencias en esta publicación están basados nuestra propia investigación y se creen fiables, no podemos asumir responsabilidad en cuanto al rendimiento obtenido por el uso de productos aquí descritos ni aceptamos cualquier responsabilidad jurídica por pérdidas o perjuicios causados directa o indirectamente por productos. El transformador es responsable de controlar la calidad, y todas las demás propiedades de nuestros productos previo uso de mismos. Nada de lo mencionado aquí debe interpretarse como inducción o recomendación para utilizar cualquier invento patentado o licencia. Synolite es una marca registrada.

04/05/2007

DSM Composite Resins

Unlimited. **DSM**

Referencias

- ¹ E. Díaz, C. Sanz, J.A. García, F. Sánchez, *Avances en la sensorización de los procesos de transferencia de resina: sensores de flujo de calor*, Actas del II Congreso Internacional de la Sociedad de Ingeniería de Fabricación, Madrid, 2007
- ² E. Díaz, I. Harismendy, C. Sanz, F. Sánchez, J.A. García, *Integración de técnicas numéricas y experimentales para el diseño de moldes de infusión de resina*. Actas del VII Congreso Nacional e Materiales Compuestos, Valladolid, 2007
- ³ E. Díaz, J.A. García, C. Sanz, *Influencia de la geometría del molde en la permeabilidad flexible de los refuerzos y núcleos de los procesos de infusión de resina*. Actas del VIII Congreso Nacional e Materiales Compuestos, San Sebastián, 2009
- ⁴ E. Díaz, C. Sanz, J.A. García, *Validation of flexible permeability characterization methods in numerical simulation of infusion processes*. Proceeding of the 10th International Conference on Flow Processes in Composites Materials, Ascona, 2010
- ⁵ E. Díaz, R. Emmerich, M. Graf, C. Röss, I. Roig, L. Chamudis, *Microwave curing of long fiber reinforced composites in an open antenna system*. Proceedings of the European Conference on Composite Materials, Venice, 2012
- ⁶ D. Hull. *An introduction to composite materials*. Ed. Reverté, S.A., ISBN 84-291-4839-6, 2003
- ⁷ R. Wool. *Bio-based polymers and composites*. Elsevier Academic Press, ISBN 0-12-763952-7, 2005
- ⁸ E. Witten. *Composites Market Report: Market Developments, Challenges, and Chances*. 2010
- ⁹ *Directiva 1999/13/CE* del consejo de 11 de marzo de 1999 relativa a la limitación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes orgánicos en determinadas actividades e instalaciones
- ¹⁰ *Real Decreto 117/2003*, de 31 de enero, sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades.
- ¹¹ *Directive 2004/42/CE* of the European parliament and of the council of 21 April 2004 on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in certain paints and varnishes and vehicle refinishing products and amending Directive 1999/13/EC
- ¹² N. Correia. *Analysis of the vacuum infusion moulding processes*, Thesis for PhD, University of Nottingham, 2004.
- ¹³ D. Bender, J. Schuster, S.G. Advani, *Flow rate control during vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing*, 2006, Composites Science and Technology, 66, 2265–2271.
- ¹⁴ Marco Method. US Patent Office, Pat No. 2495640, 1950
- ¹⁵ WH. Seeman, US Patent Office. Pat No. 4902215, 1990
- ¹⁶ C. Williams, J. Summerscales, S. Grove, *Resin infusion under flexible tooling (RIFT): a review*. Composites Part A, 1996, 27A, 517 – 524.
- ¹⁷ M. Lounderback, US Patent Office, Pat No. 0211194, 2003.
- ¹⁸ M. Bailey. US Patent Office, Pat No. 6216752, 2001.
- ¹⁹ J. Rigas. US Patent Office, Pat No. 7147818, 2006.
- ²⁰ S. Advani. US Patent Office, Pat No. 0273107, 2009
- ²¹ K. Schibsbye. US Patent Office, Pat No. 0326584, 2010

- ²² C.A. Fracchia, J. Castro, C. Tuckler III. *A finite element/control volume simulation of resin transfer moulding filling*. Proceedings of the American society for composites, fourth technical conference. Lancaster, PA: Technomic Publishing Co, Inc, 1989
- ²³ M.V. Bruschke, S.G. Advani, *A finite-element control volume approach to mold filling in anisotropic porous-media*. Polym Compos 1990; 11(6).
- ²⁴ F. Trochu, R. Gauvin, D-M. Gao, *Numerical analysis of the resin transfer molding process by the finite element method*. Adv Polym Technol 1993;12(4):329–42.
- ²⁵ E. Ruiz, F. Trochu. *Coupled non-conforming finite element and finite difference approximation based on laminate extrapolation to simulate liquid composite molding processes. Part I: isothermal flow*. Submitted to J Sci Eng Compos Mater, 2005.
- ²⁶ R. Lin, L.J. Lee, M.J. Liou. *Nonisothermal mold filling in resin transfer molding with preplaced fiber mats*. Int Polym Process J 1991;37: 356–69.
- ²⁷ R. Lin, L.J. Lee, M.J. Liou. *Mold filling and curing analysis in liquid composite molding*. Polym Compos 1993;14:71–81.
- ²⁸ T.G. Gutowski, T. Morigaki, Z. Cai. *The consolidation of laminate composites*. J Compos Mater 1987;21:172–88.
- ²⁹ A. Hammami, B.R. Gebart. *Analysis of the vacuum infusion moulding process*. Polym Compos 2000; 21(1):28–40.
- ³⁰ A. Hammami, B.R. Gebart. *Experimental investigation of the vacuum infusion moulding process. Proceedings of the eighth European conference on composite materials*. ECCM8, Naples. 1998 577–585.
- ³¹ N. Correia, F. Robitaille, A.C. Long, C.D. Rudd, P. Simacek, S.G. Advani, *Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation*. Composites: Part A, 36, (2005) 1645 – 1656.
- ³² F. Robitaille, R. Gauvin. *Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. II: Compaction and relaxation of dry and H₂O saturated woven reinforcements*. Polym Compos 1998; 19(5): 543–557.
- ³³ F. Robitaille, R. Gauvin. *Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing: I—review of experimental results*. Polym Compos 1998; 19(5):543–557.
- ³⁴ F. Robitaille, R. Gauvin, *Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing: III—reorganization of the fibre network in woven*. Polym Compos 1998; 19(5):543–57.
- ³⁵ S. Shin, W. I. Lee. *Finite element analysis of incompressible viscous flow with moving free surface by selective volume of fluid method*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21, 197-206.
- ³⁶ A. Hoeborgen, E V. Herpt, M. Labordus. *The injection of large parts using the vacuum injection technique*. In 20th Jubilee International SAMPE Conference of the Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1999, Paris, La Defense, France, Volume 1, pp. 237-246.
- ³⁷ X. Sun, S. Li, L.J. Lee, *Mold filling in vacuum assisted resin transfer molding, Part I: SCRIMP based on a high-permeable medium*. Polymer Composites, 1998, 19 (6), 807-817.
- ³⁸ M. J. Tari, J. P. Imbert, M. Y. Lin, A. S. Lavine, and H. T. Hahn. *Analysis of resin transfer molding with high permeability layers*. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 1998, 120 (3), 609-616.
- ³⁹ Kang, M. K. and W. I. Lee. *Analysis of resin transfer molding process with progressive resin injection*. In Proceedings of ICCM11, 1997, Australia, Volume IV, pp. 27-36.

- ⁴⁰ S. Bickerton, M. Sozer, P. Simacek, and S. G. Advani. *Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part II. Predictions and comparisons with experiments*. Composites part A-Applied science and manufacturing, 2000, 31: (5), 439-458.
- ⁴¹ A. Hammami, R. Gauvin, and F. Trochu. Modeling the edge effect in liquid composites molding. Composites. Part A, 1998, 29, 603-609.
- ⁴² S. Bickerton, M. Sozer, P. Simacek, and S. G. Advani. Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part II. Predictions and comparisons with experiments. Composites part A-Applied science and manufacturing, 2000, 31: (5), 439-458.
- ⁴³ K. Han, S. Jiang, and C. Z. B. Wang. *Flow modeling and simulation of SCRIMP for composites manufacturing*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing), 2000, 31 (1), 79-86.
- ⁴⁴ F. Trochu, E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, *Advanced numerical simulation of liquid composite molding for process analysis and optimization*, 2006, Composites: Part A, 37, 890-902
- ⁴⁵ H. Darcy. *The Public Fountains of the City of Dijon*. 1856.
- ⁴⁶ C.L. Tucker, R.B. Dessenberger. *Flow and Rheology in Polymeric Composites Manufacturing*. 1994, Chapter 8: Governing Equations for Flow and Heat Transfer in Stationary Fiber Beds. Elsevier Publishers, Amsterdam.
- ⁴⁷ S.G. Advani, M. V. Brusckke, R. Parnas. *Flow and Rheology in Polymeric Composites Manufacturing*. 1994, Chapter 12: Resin Transfer Molding. Elsevier Publishers, Amsterdam, 1994.
- ⁴⁸ D.L. Woerdeman, F.R. Phelan, R.S. Parnas. *Interpretation of 3-D permeability measurements for RTM modeling*. Polymer Composites 1995;16(6):470-480.
- ⁴⁹ M. Nordlund, TS. Lundström, V. Frishfelds, A. Jakovics, *Permeability network model for non-crimp fabrics*. Composites: Part A, Applied Science, 2006;37(6):826-835.
- ⁵⁰ P. Simacek, V. Neacsu, S.G. Advani. *A phenomenological model for fiber tow saturation of dual scale fabrics in liquid composite molding*. Polymer Composites, 2010;31(11):1881-1889.
- ⁵¹ A. Endruweit, A.C. Long, *A model for the in-plane permeability of triaxially braided reinforcements*. Composites: Part A – Applied Science, 2011;42(2):165-72.
- ⁵² B. Verleye, M. Klitz, R. Croce, D. Roose, S. Lomov, I. Verpoest. *Computation of permeability of textile reinforcements*. In: Zeng X, Li Y, Ruan D, Koehl L, editors. Studies in computational intelligence. Computational textile. Berlin: Springer; 2007. p. 93-109.
- ⁵³ S. Sharma, D.A. Siginer. Permeability measurement methods in porous media of fiber reinforced composites. Appl Mech Rev 2010;63(2)
- ⁵⁴ R.S. Parnas, J.G. Howard, T.L. Luce, S.G. Advani. *Permeability characterization. Part 1: A proposed standard reference fabric for permeability*. Polym Compos, 1995;16(6):429-45.
- ⁵⁵ T.S. Lundström, R. Stenberg, R. Bergström, H. Partanen, P.A. Birkeland. *In-plane permeability measurements: a Nordic round-robin study*. Composites: Part A – Applied Science, 2000;31(1):29-43.
- ⁵⁶ R. Arbter, J.M. Beraud, C. Binetruy, L. Bizet, J. Bréard, S. Comas-Cardona, C. Demaria, A. Endruweit,

P. Ermanni, F. Gommer, S. Hasanovic, P. Henrat, F. Klunker, B. Laine, S. Lavanchy, S.V. Lomov, A. Long, V. Michaud, G. Morren, E. Ruiz, H. Sol, F. Trochu, B. Verleye, M. Wietgreffe, W. Wui, G. Ziegmann, *Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise*, Composites: Part A 42, 2011, 1157–1168

⁵⁷ S. Sharma, D.A. Siginer. *Permeability measurement methods in porous media of fiber reinforced composites*. Appl Mech, Rev 2010;63(2).

⁵⁸ Y. Luo, I. Verpoest, K. Hoes, M. Vanheule, H. Sol, A. Cardon. *Permeability measurement of textile reinforcements with several test fluids*. Compos Part A, Appl Sci, 2001;32(10):1497–1504

⁵⁹ T.S. Lundström, B.R. Gebart, E. Sandlund. *In-plane permeability measurements on fiber reinforcements by the multi-cavity parallel flow technique*. Polym Compos, 1999;20(1):146–54.

⁶⁰ S.H. Ahn, W.I. Lee, G.S. Springer. *Measurement of the three-dimensional permeability of fiber preforms using embedded fiber optic sensors*. J Compos Mater, 1995;29(6):714–33.

⁶¹ J.R. Weitzenböck, R.A. Shenoi, P.A. Wilson. *Measurement of three-dimensional permeability*. Compos Part A – Appl Sci, 1998;29(1–2):159–69.

⁶² A. Endruweit, P. McGregor, A.C. Long, M.S. Johnson. *Influence of the fabric architecture on the variations in experimentally determined in-plane permeability values*. Compos Sci Technol, 2006;66(11–12):1778–92.

⁶³ T. Luthy, M. Landert, P. Ermanni. *1D-permeability measurements based on ultrasound and linear direct current resistance monitoring techniques*. J Mater Process Manuf, 2001;10(1):25–43

⁶⁴ P. Ferland, D. Guittard, F. Trochu, *Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer moulding*, Polymer Composites, 1996, 17(1): 149-158

⁶⁵ A.S. Verheus, J.H.A. Peeters. *The role of reinforcement permeability in resin transfer moulding*. Compos Manuf, 1993;4(1):33–8.

⁶⁶ K.L. Adams, L. Rebenfeld, *In-plane flow of fluids in fabrics: structure/flow characterization*. Text Res J, 1987;57(11):647–54.

⁶⁷ K.L. Adams, W.B. Russel, L. Rebenfeld. *Radial penetration of a viscous liquid into a planar anisotropic porous medium*. Int J Multiphase Flow, 1988;14(2):203–15.

⁶⁸ A.W. Chan, S.T. Hwang. *Anisotropic in-plane permeability of fabric media*. Polym Eng Sci, 1991;31(16):1233–1239.

⁶⁹ J.R. Weitzenböck, R.A. Shenoi, P.A. Wilson. *Radial flow permeability measurement. Part A: Theory*. Compos Part A – Appl Sci, 1999;30(6):781–96

⁷⁰ J.R. Weitzenböck, R.A. Shenoi, P.A. Wilson. *Radial flow permeability measurement. Part B: Application*. Compos Part A – Appl Sci, 1999;30(6):797–813.

⁷¹ W.B. Young, S.F. Wu. *Permeability measurement of bidirectional woven glass fibers*. J Reinf Plast Comp 1995;14(10):1108–1120.

⁷² Chan AW, Larive DE, Morgan RJ. *Anisotropic permeability of fiber preforms: constant flow rate measurement*. J Compos Mater, 1993;27(10):996–1008.

⁷³ K.K. Han, C.W. Lee, B.P. Rice. *Measurements of the permeability of fiber preforms and applications*. Compos Sci Technol, 2000;60(12–13):2435–41.

⁷⁴ R.S. Parnas, A.J. Salem. *A comparison of the unidirectional and radial in-plane flow of fluids through woven composite reinforcements*. Polym Compos, 1993;14(5):383–94.

⁷⁵ B.R. Gebart, P. Lidström. *Measurement of in-plane permeability of anisotropic fiber reinforcements*. Polym Compos, 1996;17(1):43–51.

- ⁷⁶ K.M. Pillai, *Modeling the unsaturated flow in liquid composite molding processes: a review and some thoughts*. J Compos Mater, 2004;38(23): 2097–118.
- ⁷⁷ G.R. Palmese, V.M. Karbhari. *Effects of sizings on microscopic flow in resin transfer molding*. Polym Compos, 1995;16(4):313–8.
- ⁷⁸ K.J. Ahn, J.C. Seferis, J.C. Berg. *Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements*. Polym Compos, 1991;12(3):146–52.
- ⁷⁹ M. Koefoed, *Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades*. 2003, Chapter 5. Thesis for PhD, Aalborg University.
- ⁸⁰ N. Correia, F. Robitaille, A.C. Long, C.D. Rudd, P. Simacek, S. G. Advani, *Use of resin transfer moulding simulation to predict flow, saturation and compactation in VARTM Process*, Journals of fluid engineering, 2004, 126, 210-215
- ⁸¹ Kendall KN, Rudd CD. *Flow and cure phenomena in liquid composite molding*. Polym Comp 1994;15:334-48
- ⁸² Parnas RS. *Liquid Composite Molding*. Cincinnati: Hanser Gardner, 2000
- ⁸³ Han K, Lee LJ. *Dry Spot formation and changes in liquid composite molding: I – experimental*. J Comp Mater 1996;30:1458-93.
- ⁸⁴ Patel N, Rohatgi V, Lee LJ. *Micro scale flow behaviour and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fiberglass mat*. Polym Eng Sci 1995;35:837-51
- ⁸⁵ Chan AW, Morgan RJ. *Modeling perform impregnation and void formation in resin transfer molding of unidirectional composites*. SAMPE Quarterly 1992;23:48-52
- ⁸⁶ Shim S-B, Ahn K, Seferis JC. *Flow and void characterization of stitched structural composites using resin film infusion process (RFIP)*. Polym Comp 1984;15:539-40
- ⁸⁷ Brosius D, Clarke S. *Textile performing techniques for low cost structural composites*. In: Proc. 7th Annual ASM/ESD Advanced Comp. Conf. Mater., 1991. p. 1-10
- ⁸⁸ Liu B, Bickerton S, Advani SG. *Modeling and simulation of resin transfer molding: gate control, venting and dry spot prediction*. Comp Part A: Applied Sci Manuf 1996;27:135-41
- ⁸⁹ Binetruy C, Hilaire B, Pabiot J. *The interactions between flows occurring inside and outside fabric tows during RTM*. Comp Sci Technol 1997;57:587–96.
- ⁹⁰ Andrew D, Lee WI, Hanratty FW. *A study of an opto-ultrasonic technique for cure monitoring*. Fiber Optic Smart Structures and Skinsiv, SPIE 1991;1588:264–74.
- ⁹¹ Rokhlin SI. *Real-time study of frequency dependence of attenuation and velocity of ultrasonic waves during the curing reaction of epoxy resin*. J Acoust Soc Amer 1986;79:1786–92.
- ⁹² Talaie A, Kosaka T, Oshima N, Asano Y, Fukuda T. *Report on a simultaneous ion viscosity, strain and impedance measurement technique using a novel integrated dielectric, optical fiber and piezoelectric sensing element for the online characterization of smart structures*. Smart Materials and Structures 2001;10:326–31.
- ⁹³ George GA. *New approaches to the characterization of the cure of epoxy resins for advanced composite materials*. Materials Forum 1986;9:224–36.
- ⁹⁴ Chensha Li, et al. *Fiber-optic composite cure sensor: monitoring the curing process of composite material based on intensity modulation*.
- ⁹⁵ Woerdeman DL, Parnas RS. *Model of a fiber-optic evanescentwave fluorescence sensor*. Applied Spectroscopy 2001;55:331–7.

- ⁹⁶ Woerdeman DL, Spoerre JK, Flynn KM, Parnas RS. *Cure monitoring of the liquid composite molding process using fibre optics sensors*. *Polymer Composite* 1997;18:133–50.
- ⁹⁷ Powell GR, Fernando GF. *In situ cure monitoring of advanced fibre reinforced composites*. *SPIE* 1995;2444:386–95.
- ⁹⁸ Schwab SD, Levy RL, Lind AC, Wear FC. *Monitoring conventional and microwave curing of polymers and composites with the fluorescence optrode cure sensor (FOCS)*. In: Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings, Vol. 37. Sponsored by: SPE Publ by Soc of Plastics Engineers; 1991. p.1668–1671.
- ⁹⁹ Dang W, Sung NH. *In-situ cure monitoring of diamine cured epoxy by fiber optic fluorimetry using extrinsic reactive fluorophore*. *Polymer Engineering and Science* 1994;34:709–16.
- ¹⁰⁰ Dunkers JP, Lenhart JL, Kueh SR, Vanzanten JH, Advani SG, Parnas RS. *Fiber optic flow and cure sensing for liquid composite molding*. *Optics and Lasers in Engineering* 2001;35:91–104.
- ¹⁰¹ Afromowitz MA. *Fiber optic polymer cure sensor*. *Journal of Lightwave Technology* 1988;8:1591–1594.
- ¹⁰² Lam KY, Afromowitz MA. *Fiber optic epoxy composite cure sensor: I. Dependence of refractive-index of an autocatalytic reaction epoxy system at 850 nm on temperature and extent of cure*. *Applied Optics* 1995;34:5635–8.
- ¹⁰³ Lam KY, Afromowitz MA. *Fiber optic epoxy composite cure sensor: II. Performance-characteristics*. *Applied Optics* 1995;34:5638–44.
- ¹⁰⁴ Afromowitz MA. *Fiber optic polymer cure sensor*. *Journal of Lightwave Technology* 1988;8:1591–4.
- ¹⁰⁵ Lam KY, Afromowitz MA. *Fiber optic epoxy composite cure sensor: I. Dependence of refractive-index of an autocatalytic reaction epoxy system at 850 nm on temperature and extent of cure*. *Applied Optics* 1995;34:5635–8.
- ¹⁰⁶ Lam KY, Afromowitz MA. *Fiber optic epoxy composite cure sensor: II. Performance-characteristics*. *Applied Optics* 1995;34:5638–44.
- ¹⁰⁷ George M. Maestros et al. *Dielectric monitoring of cure in a comercial carbon-fibre composite*. *Composites Science and Technology*, 1995, 53, 355-359.
- ¹⁰⁸ D. Murat, G. Tuncola, A. Kaynara, E. M. Sozer, *Monitoring of resin flow in the resin transfer molding (RTM) process using point-voltage sensors*, *Composites Science and Technology*, 2007, 67, 367-379
- ¹⁰⁹ <http://www.thermoflux.ch/tfx-technology/sensors/conductive>
- ¹¹⁰ S.G. Advani, Sozer M. *Process Modeling in Composites Manufacturing*. NY: Marcel Dekker; 2002.
- ¹¹¹ E.J.Rigas, S.M. Walsh, W.A. Spurgeon. *Development of a Novel Processing Technique for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)*. *Congreso Internacional SAMPE* 2001
- ¹¹² S.G. Advani, M.V. Brusckke, R. Parnas, *Resin Transfer Molding. Flow and Rheology in Polymeric Composites Manufacturing*. Ed. Elsevier, 1994 p. 465 – 516.
- ¹¹³ C.D. Rudd, E.V. Rice, L.J. Bulmer, A.C. Long, *Process Modeling and Design for Resin Transfer Molding*. *Plast. Rubber Compos. Process Appl.*, 1993, 67 - 76