

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE MATERIALES AVANZADOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE PIEZAS DE COMPOSITE A PARTIR DE PREIMPREGNADOS DE CURADO ULTRAVIOLETA MEDIANTE PRENSA DE MEMBRANA



Estudiante: Ávila Pérez, Ion

Directora: Iriondo Hernández, Aitziber

RESUMEN

Se prevé un aumento significativo en el uso de materiales compuestos en aplicaciones de movilidad eléctrica debido a sus características específicas y a la demanda existente en este sector. En la actualidad, las piezas necesarias para el ámbito ferroviario y automotriz se fabrican mediante el proceso de laminación manual, el cual presenta tiempos de ciclo prolongados de hasta 48 horas y un coste por unidad de pieza que podría mejorarse.

En este sentido, los avances en la formulación de resinas de curado ultravioleta han permitido idear un proceso de fabricación de piezas compuestas utilizando una prensa de membrana y resinas de curado ultravioleta. Este proceso ofrece la posibilidad de fabricar tejidos previamente impregnados con una relación fibra-resina específica, los cuales pueden utilizarse para la producción de piezas con la misma calidad que el proceso de laminación manual. Sin embargo, se logra un mayor control sobre los espesores gracias al uso de los preimpregnados, además de alcanzar tiempos de ciclo hasta 25 veces más rápidos y un menor coste por unidad de pieza.

Mediante este trabajo se ha obtenido la modelización de comportamiento de máquina para el control de parámetros de proceso, se han optimizado tiempos de ciclo mediante la construcción de un modelo matemático de tiempos de curado y se ha conseguido fabricar piezas con la misma calidad que el proceso de fabricación que es competencia directa.

Palabras clave: Composite, ultravioleta, fabricación, laminación, compactación, industrialización, movilidad eléctrica.

LABURPENA

Haien ezaugarri espezifiko eta elektromugikortasun aplikazioetan beharrezkoak diren berezitasunak direla eta, material konposatuen erabilera hazkunde garrantzitsua espero da etorkizuneko urteetan. Egungoan, trenbide eta automozio-sektorean pieza eskariak eskuzko laminazio bidez sortzen dira. Prozesu honek iraupen ziklo luzeak ditu, 48 ordu arte, eta pieza bakoitzeko kostua hobetzeko aukera dago.

Horregatik, ultramorez ontzen diren errexinen formulazioen aurrerapenei esker, mintza prentsa bidez konpaktatzen diren eta ultramore argiz ontzen duten piezen fabrikazio prozesua diseinatu da. Prozesu honek erabiltzaileak esleitutako errexina portzentaia duten aurreinpregnatutako ehunak fabrikatzea ahalbidetzen du, eta horiek erabiliz, eskuzko laminazio prozesuan fabrikatzen diren piezen kalitate berdina duten piezak fabrikatzeko aukera ematen du. Hala ere, lodiera kontrolatzea ahalbidetzen du aurreinpregnatuen erabilera dela eta. Horrez gain, ziklo denborak 25 aldiz azkarragoak eta pieza bakoitzeko kostu txikiagoak izaten dira.

Lan honen bidez, makinak duen portaeraren modelaketa eginez, prozesuaren parametroak kontrolatzea lortu da. Ziklo denboren optimizazioa ere lortu da ontze-prozesuaren denbora eredu matematiko bat eraikiz eta lehiakide zuzena den prozesuaren pieza kalitate berdina fabrikatzea lortu da.

Hitz gakoak: Konposite, ultramorea, laminazioa, konpaktazioa, industrializazioa, mugikortasun elektrikoa.

ABSTRACT

There will be a significant increase in the use of composite materials in electric mobility applications, thanks to their specific characteristics and the demand for them in this sector. Currently, the demand for parts in the railway and automotive industries is met through the manual lamination process. This process has long cycle times of up to 48 hours and cost per unit could be improved in comparison with the hand layup process.

Therefore, with advancements in the formulation of ultraviolet curing resins, a manufacturing process has been devised for composite parts using ultraviolet curing resin in a membrane press. This process allows the user to manufacture pre-impregnated fabrics with a specific fiber-to-resin ratio and use them to produce parts with the same quality as the manual lamination process but having control over thicknesses thanks to the use of pre-impregnated materials. This results in cycle times up to 25 times faster and lower cost per unit.

Through this work, machine behavior modeling has been achieved for process parameter control. Cycle times have been optimized by constructing a curing time mathematical model, and it has been determined that parts of the same quality as the direct competitor's manufacturing process have been successfully produced.

Keywords: Composite, ultraviolet, fabrication, lamination, compaction, industrialization, electric mobility.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Centro tecnológico IDEKO.	3
Figura 2. Laboratorio de composites de IDEKO.	3
Figura 3. Clasificación de los materiales compuestos de matriz polimérica según matriz y refuerzo.	10
Figura 4. Porcentaje de uso de los materiales compuestos por sector.	11
Figura 5. Diagrama del proceso de moldeo por transferencia de resina.	12
Figura 6. Diagrama del proceso de infusión por vacío.	13
Figura 7. Diagrama del proceso de pultrusión en el que el material viaja de izquierda a derecha.	14
Figura 8. Esquema del proceso de "Filament winding".	15
Figura 9. Esquema del proceso de fabricación de SMC.	16
Figura 10. Imagen representativa del proceso de Hand lay-up en la que se puede ver a varios operarios impregnando tela de fibra de vidrio con rodillo... ..	16
Figura 11. Representación esquemática del proceso por prensa de membrana HDF.	17
Figura 12. Proceso de UV drape forming.	18
Figura 13. Esquema de la reacción del mecanismo de polimerización por radiación UV.	20
Figura 14. Cinética del proceso de polimerizado del fotoiniciador.	20
Figura 15. Máquina de fabricación de preimpregnados de curado UV. Se muestran de izquierda a derecha las 3 fases mencionadas; desbobinado, impregnación y bobinado.	22
Figura 16. Parte de desbobinado de la máquina de fabricación de preimpregnados.	23
Figura 17. Parte de impregnación de la máquina de fabricación de prepregs.	23
Figura 18. Parte de bobinado de la máquina de fabricación de preimpregnados.	24
Figura 19. Prensa de membrana de GLOBAL.	25
Figura 20. Arriba el molde 1. Abajo el molde 2.	26
Figura 21. Lámpara utilizada en el proceso de curado UV. Formada por dos lámparas HÖNLE LEDLINE500.	26
Figura 22. Báscula de precisión KERN ALJ.	27
Figura 23. UV-Meter de HÖNLE.	28
Figura 24. Movimiento de los iones y rotación de los dipolos de un material. .	28
Figura 25. Gráfica de una medición del tiempo de curado. 1) Inicio de la medición, 2) Inicio de curado, 3) Ralentización de la reacción, 4) Aproximación a "plateau" y 5) Curado total.	29
Figura 26. Desbobinado de prepregs.	30
Figura 27. Gelcoat aplicado.	30
Figura 28. Prepregs colocados en el molde.	31
Figura 29. Pieza final fabricada a partir del molde 1.	32
Figura 30. Esquema de la impregnación de telas mediante rodillo.	32
Figura 31. Rango de distancia en la que la impregnación es homogénea.	35
Figura 32. Representación gráfica del muestreo recogido del prepreg.	36

Figura 33. Ensayos a una temperatura entre 35 y 40 °C. Valores de distancia (d) comprendidos entre 0,9 y 1,3 mm. Entre estos valores el porcentaje en fibra no varía en función de la distancia sólo de la abertura (e).	37
Figura 34. Relación entre la viscosidad y la temperatura de la resina utilizada para la fabricación de prepregs.	37
Figura 35. Moldes utilizados en el proceso de HLU. Sin adaptar.	39
Figura 36. Moldes con la primera versión de la adaptación al proceso de UVDF.	39
Figura 37. Defecto de pliegues formados en los preimpregnados.....	41
Figura 38. El defecto A de la pieza final está formado por la imperfección B del contramolde utilizado para fabricarla.....	42
Figura 39. Base lisa a partir de una pieza para la fabricación del contramolde.	43
Figura 40. Arriba la versión 1 del contramolde fabricado sobre superficie lisa y abajo la segunda versión del contramolde fabricado sobre prepregs sin curar.	43
Figura 41. Diseño de los anclajes de los prepregs y evitar así su desplazamiento. Fabricados con las mismas características que el contramolde de la pieza completa.	44
Figura 42. Esquema del proceso de curado.....	46
Figura 43. Curva de irradiancia en función de la distancia horizontal LL para una distancia d cualquiera.....	47
Figura 44. Mapa de gradiente de la lámpara UV LEDLINE500 de HÖNLE	49
Figura 45. Obtención de las ecuaciones del 75, 50, 25 y 0% del valor máximo de la emisión.....	50
Figura 46. Comparativa entre los tiempos de curado totales usando el modelo de emisión simplificada y el modelo experimental.....	52
Figura 47. Comparativa entre las curvas del modelo de emisión simplificada, el modelo experimental y datos de tiempo de curado experimentales, éstos últimos ilustrados en negro.....	53
Figura 48. Las 9 piezas fabricadas con el objetivo de mejorar la calidad visual de la pieza. Ordenadas por orden cronológico.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los proyectos predecesores al actual. Se listan en orden cronológico con los objetivos y resultados correspondientes.	4
Tabla 2. Diagrama de Gantt de la planificación del proyecto.	8
Tabla 3. Resultados de la primera prueba para los dos gramajes de tela mat. 34	
Tabla 4. Resultados obtenidos de los diferentes ensayos variando el parámetro e. Se ha obtenido el promedio con su correspondiente desviación estándar... 36	
Tabla 5. Energía necesaria para el curado total de una pieza con 3 capas de mat300 con 30% de PCF.	49
Tabla 6. Puntos necesarios para el cálculo de la ecuación de difusión horizontal de la lámpara.....	51
Tabla 7. Resultados de las mediciones de las piezas del molde 1. "P" significa "pieza" y la nomenclatura "1-1" hace referencia a "molde-pieza". Los datos representan una medida principal junto a su desviación estándar.	54
Tabla 8. Resultados de la caracterización de las 9 piezas fabricadas según el método de fabricación.	55
Tabla 9. Resumen de tiempos de ciclo.	57

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Contexto.....	2
2.1. Colaboración	2
2.2. Proyectos predecesores	4
3. Objetivos y alcance del proyecto	5
3.1. Objetivos parciales	5
3.2. Objetivos de desarrollo sostenible	6
4. Beneficios del proyecto	7
5. Planificación	8
6. Estado del arte	9
6.1. Materiales compuestos.....	9
6.1.1. Composites de matriz polimérica.....	9
6.1.2. Ventajas y desventajas.....	10
6.1.3. Aplicaciones	11
6.2. Procesos de fabricación de PMC.....	12
6.2.1. Moldeo por transferencia de resina	12
6.2.2. Infusión por vacío	13
6.2.3. Pultrusión	13
6.2.4. Filament winding.....	14
6.2.5. Sheet Moulding Compound	15
6.2.6. Laminación manual	16
6.2.7. UV drape forming	17
6.3. Métodos de curado.....	18



6.3.1. Curado a temperatura ambiente	18
6.3.2. Curado por temperatura	19
6.3.3. Curado por haz de electrones.....	19
6.3.4. Curado por ultravioleta	19
7. Metodología experimental	21
7.1. Materiales.....	21
7.1.1. Fibras mat	21
7.1.2. Resina	21
7.1.3. Fotoiniciador	21
7.1.4. Gelcoat.....	21
7.2. Equipamiento	22
7.2.1. Máquina de fabricación de prepregs.....	22
7.2.2. Prensa de membrana	25
7.2.3. Moldes.....	25
7.2.4. Lámpara de curado UV.....	26
7.3. Técnicas de caracterización	27
7.3.1. Porcentaje en fibra	27
7.3.2. Medición de la irradiancia	28
7.3.3. Medición del tiempo de curado	28
7.3.4. Caracterización de piezas	29
7.4. Descripción del proceso de fabricación de piezas	29
7.5. Descripción de las fases de investigación	32
7.5.1. Fase 1: Fabricación de prepregs	32
7.5.2. Fase 2: Uso de moldes.....	33

7.5.3. Fase 3: Compactación y curado	33
7.5.4. Fase 4: Obtención de la pieza final.....	33
8. Resultados y discusión.....	34
8.1. Resultados de la Fase 1: Fabricación de prepregs.....	34
8.2. Resultados de la Fase 2: Uso de moldes	38
8.3. Resultados de la Fase 3: Compactación y curado.....	41
8.3.1. Diseño del contramolde para compactación	41
8.3.2. Uso de membranas y segunda alternativa.....	43
8.3.3. Modelo de tiempos de curado.....	44
8.3.3.1. Medición de la irradiancia	45
8.3.3.2. Medición del tiempo de curado	45
8.3.3.3. Proceso experimental de compactación y curado....	45
8.3.3.4. Determinación de la mitigación de luz de los utillajes	46
8.3.3.5. Aproximación teórica	46
8.3.3.6. Obtención de H_e mediante I_e y t_e	48
8.3.3.7. Obtención del área bajo la curva	49
8.3.3.8. Cálculo del tiempo total de curado.....	51
8.3.3.9. Demostración del cálculo del tiempo total de curado	52
8.4. Resultados de la Fase 4: Obtención de la pieza final	53
9. Memoria económica	56
10. Conclusiones.....	57
11. Líneas futuras.....	58
12. Bibliografía	60

1. Introducción

En los últimos años, el uso de composites, también denominados materiales compuestos, ha crecido considerablemente y se prevé que su utilización aumente en un 12,38% hasta 2030 [1]. Su fabricación, a pesar de haberse desarrollado desde la creación de los composites, sigue dependiendo de procesos manuales en los que el tiempo de fabricación es un factor significativo a la hora de reducir los costes de estos materiales, ya que una de las formas de reducir el coste unitario es aumentar el número de unidades fabricadas. Con este objetivo en mente, diferentes tecnologías de curado han sido desarrolladas, entre ellas, el curado por radiación ultravioleta (UV) [2] [3], utilizada en materiales compuestos de fibra de vidrio y resina. Este tipo de curado se caracteriza por su alta velocidad, consiguiendo un curado completo en minutos en comparación con el curado tradicional por temperatura que cura en horas e incluso días. Las aplicaciones más conocidas de este tipo de curado se dan en odontología para la fabricación de dientes de composites de matriz polimérica (PMC). Sin embargo, por lo ya mencionado, la tecnología de curado UV es de gran interés para sectores como el automotriz [4]. Además, el proceso planteado en este trabajo tiene un mayor control en los parámetros de pieza a diferencia de su competidor directo, como se verá más adelante.

2. Contexto

El presente proyecto es la continuación de varios proyectos desarrollados en el centro tecnológico IDEKO S. COOP que tienen como objetivo la industrialización de un proceso de fabricación de piezas composite mediante el uso de preimpregnados (prepregs) de curado UV a partir de telas de fibra de vidrio y en prensa de membrana.

2.1. Colaboración

Como ya se ha indicado previamente, el proyecto ha sido realizado en colaboración con IDEKO S. COOP (**Figura 1**), centro tecnológico perteneciente a DANOBATGROUP S. COOP.

Fundada en 1986 y con más de 100 empleados, IDEKO se especializa en la investigación en fabricación avanzada de diferentes tipos de procesos, principalmente en el ámbito de la máquina herramienta. Cuenta con 4 grupos de investigación; dinámica y control, diseño e ingeniería de precisión, TICs (Tecnologías de la Información y Comunicaciones) y automatización y procesos de fabricación. Todos los grupos cuentan con diversos subgrupos que trabajan en diferentes áreas relacionadas con el departamento. El proyecto ha sido realizado en el departamento de procesos de fabricación, el cual se especializa en tecnologías de mecanizado por arranque y abrasión y transformación de materiales. Sus principales áreas de trabajo son:

- Diseño de líneas de mecanizado.
- Diseño y optimización de procesos de mecanizado como el fresado, rectificado, torneado y corte por láser.
- Desarrollo de tecnologías de fabricación de composite basadas en procesos de laminación, corte, impregnación y curado.

El objetivo principal del departamento es optimizar procesos de fabricación para ganar eficiencia, reducir costes, mejorar la calidad y garantizar la seguridad del producto.



Figura 1. Centro tecnológico IDEKO.

El área de procesos de fabricación en el que se desarrolla este trabajo ha sido la de materiales compuestos en las instalaciones del edificio 1 de IDEKO. En los últimos 12 años, han conseguido crear un proceso de fabricación de piezas de composite de curado UV con una formulación de resina patentada por el propio centro y haciendo uso de una máquina de fabricación de prepregs. La máquina prototipo utilizada en la fabricación de prepregs ha sido diseñada y puesta en marcha por IDEKO y actualmente se encuentra en desarrollo.



Figura 2. Laboratorio de composites de IDEKO.

El objetivo actual de la línea de composites es conseguir utilizar una prensa de membrana y los prepregs de curado UV, de los cuales se hablará más adelante, como alternativa a los procesos actualmente usados en la fabricación de piezas de composite de fibra de vidrio, siendo este proceso, a priori, más eficiente en cuanto a cadencia, reduciendo así el coste por unidad y mano de obra. El proceso ha sido denominado UVDF (Ultraviolet Drape Forming). Todo esto ha sido desarrollado en el laboratorio de composites que se puede observar en la **Figura 2.**

2.2. Proyectos predecesores

Como se ha mencionado en la introducción del contexto, este proyecto es una continuación de una serie de proyectos que tienen como objetivo principal la industrialización del proceso de fabricación de piezas de composite. En la **Tabla 1** se muestra una lista de los proyectos anteriores con sus objetivos y resultados:

Tabla 1. Resumen de los proyectos predecesores al actual. Se listan en orden cronológico con los objetivos y resultados correspondientes.

Año	Objetivo	Resultado
2011	Curado ultravioleta de polímeros y composites para palas de aerogeneradores	Análisis del curado capa a capa
2012	Tecnología sostenible para la aplicación de composites en automoción	Prototipo de impregnación y curado de telas
2012	Fabricación automática de alta productividad de composites de fibra de vidrio	Cámara de impregnación de resina
2015	Curado UV por etapas de composites de bajo espesor	Desarrollo de la resina UV
2015	Carrocerías ligeras para vehículos de emergencia	Inicio de la automatización con prepregs
2016	Construcción IKASUN	Prototipo de fabricación de prepregs
2016	Prototipo de compactación UV	Robot de compactación
2016	Nuevos composites ignífugos de curado UV para vehículos ferroviarios	Inicio del desarrollo de fabricación de componentes ignífugos
2017	Automatización de los procesos de corte, compactación y curado de composites de fibra de vidrio y resina de curado UV	Continuación del prototipo de fabricación de prepregs y compactación mediante bolsa de vacío
2020	Desarrollo de composites ignífugos	Composites de fibra de vidrio y curado ultravioleta ignífugos
2023	Desarrollo de un proceso automático de fabricación de piezas de tren y autobús mediante preimpregnados de curado UV en prensa de membrana	En desarrollo

La investigación en cada uno de estos proyectos ha avanzado un paso más hacia el objetivo principal y el siguiente paso lo da el presente trabajo de fin de máster.

3. Objetivos y alcance del proyecto

En base a lo mencionado previamente, el objetivo principal de este proyecto fin de máster es la mejora y optimización de un proceso de fabricación de piezas de composite partiendo de preimpregnados de curado UV. Para ello, se pretende mejorar los tiempos de ciclo y la calidad de la pieza en general, controlando los espesores y el porcentaje de fibra de cada pieza. Para alcanzar el mencionado objetivo, se han establecido diferentes objetivos parciales.

3.1. Objetivos parciales

En cuanto a los objetivos parciales del proyecto se pueden considerar los siguientes puntos, los cuales se ordenan por fases del proceso:

- **Fase 1: Fabricación de preimpregnados de curado UV.**
 - Determinación de los parámetros de máquina para la obtención de un porcentaje de contenido en fibra (PCF) concreto para las telas mat 300 y mat 225.
- **Fase 2: Uso de moldes.**
 - Establecimiento de criterios de diseño para la adaptación de moldes en el nuevo proceso.
- **Fase 3: Compactación y curado.**
 - Diseño de utillajes para ayudar a la membrana en la compactación.
 - Obtención de un modelo que prediga los tiempos de curado de una pieza según su geometría y distancia al foco de luz UV.
- **Fase 4: Obtención de la pieza final.**
 - Medición de espesores para comprobar homogeneidad en la pieza
 - Calidad visual



3.2. Objetivos de desarrollo sostenible

El proyecto también está en estrecha relación con los objetivos de desarrollo sostenible marcados por la Unión Europea. Concretamente, este proyecto se enmarca en los objetivos 9, 11 y 13, cuya acción se define en los siguientes puntos:

- **Objetivo 9. Industria, innovación e infraestructura:** Este proyecto pretende innovar en los procesos de fabricación actuales con el fin de volver más eficiente la fabricación de piezas de composite, siendo capaces de producir un mayor número de vehículos de transporte público, los cuales harán uso de estas piezas.
- **Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles:** El proceso de fabricación de estos elementos está centrado en la fabricación de piezas para trenes y autobuses. En el futuro, se pretende que los autobuses sean cero emisiones por lo que la reducción de peso que aportan las piezas de composite es imprescindible [5].
- **Objetivo 13. Acción por el clima:** Las emisiones de efecto invernadero producidas por los vehículos a combustión son parte del problema asociado con el cambio climático. Una reducción de estas emisiones mediante la transición al transporte público sostenible es necesaria. Este proyecto dota de las piezas necesarias a estos vehículos.

4. Beneficios del proyecto

El desarrollo de este trabajo puede suponer un cambio en la forma en la que actualmente se fabrican este tipo de piezas. El curado UV permite tiempos de fabricación mucho más rápidos que con curados tradicionales [6], como ya se explicará en los próximos apartados. Esto da lugar a una reducción de costes muy interesante, por lo que se podría aumentar la producción de piezas de composite.

Además, es un proceso que no genera apenas residuos químicos y es energéticamente eficiente en comparación con métodos que requieren calor para el curado de las resinas [7], [8].

5. Planificación

Con el fin de establecer un ritmo de trabajo que permita terminar las tareas y alcanzar el objetivo en las fechas previstas, se ha creado un diagrama de Gantt en periodos mensuales. Dicho diagrama se presenta en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Diagrama de Gantt de la planificación del proyecto.

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Estudio de moldes										
Proceso actual										
Propuesta de nuevo proceso										
Necesidades de utillajes										
Contramolde y anclajes										
Parametrización del proceso										
Parámetros de máquina										
Tiempos de curado										
Caracterización de piezas										
Espesores										
Calidad visual										
TFM										
Memoria										
Presentación										

Cabe recordar que en la práctica se generan ciertos desfases en cuanto a la planificación establecida debido a problemas de logística, averías, etc.



6. Estado del arte

Actualmente, la gran mayoría de los procesos de fabricación de piezas de composite de fibra de vidrio se basan en el curado por temperatura [9]. Este apartado pretende explicar qué son los materiales compuestos, cuáles son sus procesos de fabricación habituales y los tipos de curado de resina existentes con el fin de hacer una comparativa con el proceso de fabricación que se ha desarrollado en este proyecto.

6.1. Materiales compuestos

Los materiales compuestos o composites son aquellos materiales que se componen de dos o más fases distintas. Las fases se combinan de tal manera que se consiguen unas propiedades de las que las fases por sí mismas carecen, creando un efecto de sinergia. En estos materiales, la fase dispersa o refuerzo se halla en un medio continuo llamado matriz [10]. Un ejemplo común de material compuesto es el marco de una bicicleta fabricado en fibra de carbono, en el que el refuerzo sería la fibra de carbono y la matriz una resina epoxi. A continuación, se explican qué son los materiales compuestos de matriz polimérica y los procesos de fabricación y de curado más empleados.

6.1.1. Composites de matriz polimérica

Como para este trabajo fin de máster se hace uso de PMC, la explicación se centrará en este grupo [11].

Hoy en día las matrices más utilizadas son las termoestables, aunque las termoplásticas están ganando terreno debido a su reciclabilidad [12] y sostenibilidad, característica que hoy en día está adquiriendo importancia en el desarrollo de nuevas tecnologías [13].

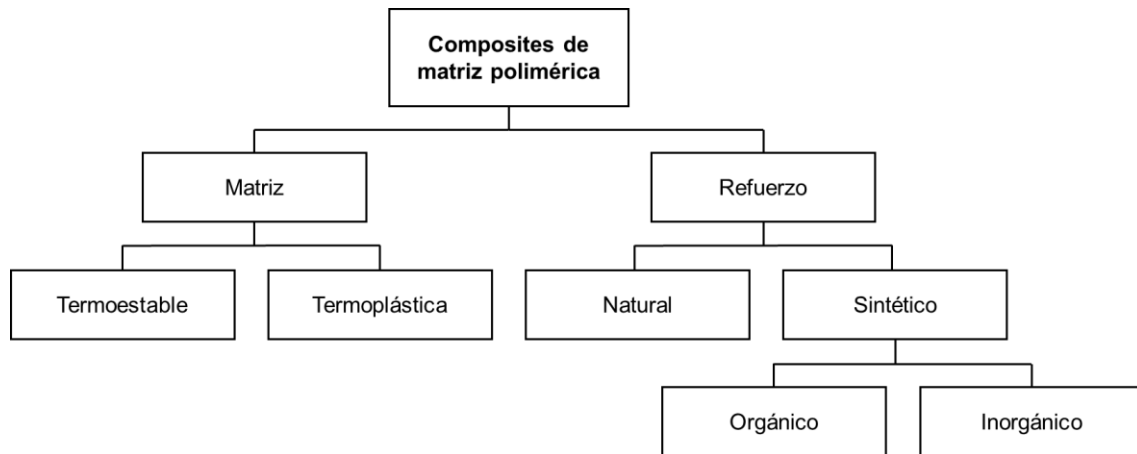


Figura 3. Clasificación de los materiales compuestos de matriz polimérica según matriz y refuerzo.

6.1.2. Ventajas y desventajas

En cuanto a las desventajas de los PMC, la primera es el coste de fabricación. Los materiales compuestos son relativamente novedosos, no cuentan con un desarrollo tan cimentado como lo tiene la industria del metal, y por ello, son materiales cuya fabricación seriada todavía no se ha alcanzado (en el caso de piezas de geometría compleja). El acero lleva existiendo desde años antes de cristo y desde entonces la tecnología se ha desarrollado lo suficiente como para reducir los costes significativamente. Este no es el caso de los composites, ya que al ser una tecnología reciente y cuyos procesos de fabricación aún están siendo desarrollados, no se ha conseguido fabricar tiradas grandes de producto [14] y, por ello, el precio respecto a los materiales comunes es alrededor de 3 veces mayor, solo teniendo en cuenta la materia prima. Concretamente, 1 kg de acero cuesta 0,62 \$ mientras que 1kg de fibra de vidrio cuesta 1,8 \$ [15], lo que los convierte en una opción válida únicamente cuando las especificaciones técnicas sean el factor más importante a tener en cuenta. Otro factor importante como desventaja de los materiales compuestos es su mala reciclabilidad [16]. A diferencia de los metales, que son fácilmente separables entre sí, los materiales que forman los composites de matriz termoestable son difíciles de recuperar. Si la resina es termoestable su degradación a altas temperaturas imposibilita su recuperación y en el caso de las fibras son necesarios procesos pirolíticos que son energéticamente muy exigentes. Por ello se está desarrollando la posibilidad de emplear matrices termoplásticas [17], las cuales se pueden fundir para ser recuperadas, pudiendo separar matriz de refuerzo.

A pesar de todo ello, los PMC tienen grandes ventajas. En particular su resistencia específica, es decir, su resistencia por unidad de masa. Son materiales con un módulo de Young similar al acero llegando a pesar hasta un 70 % menos [18]. Esto los hace una elección interesante en aplicaciones en la que el peso sea un factor determinante. También cuentan con una resistencia a la corrosión superior a cualquier metal estructural [19], por lo que es posible emplear estos materiales en construcciones que se realicen en lugares de gran humedad. Además, a pesar de que se degradan como cualquier otro material, su duración es mayor que las de algunos materiales estructurales más utilizados en aplicaciones como perfiles o vigas.

6.1.3. Aplicaciones

Los materiales compuestos tienen cabida en prácticamente toda la industria. Por ahora, tal y como se puede observar en la **Figura 4** [20], el sector en el que más se implementan es de transporte. Además, con el actual auge por normativa europea de la movilidad eléctrica y los grandes proyectos eólicos [21], los materiales compuestos empezaran a dejarse ver de forma importante en el sector de la automoción, debido a la necesidad de los fabricantes de aumentar la ligereza de los vehículos, aumentando así la duración de la batería. O de construir aerogeneradores cada vez más grandes gracias a la resistencia específica que proporcionan estos materiales.

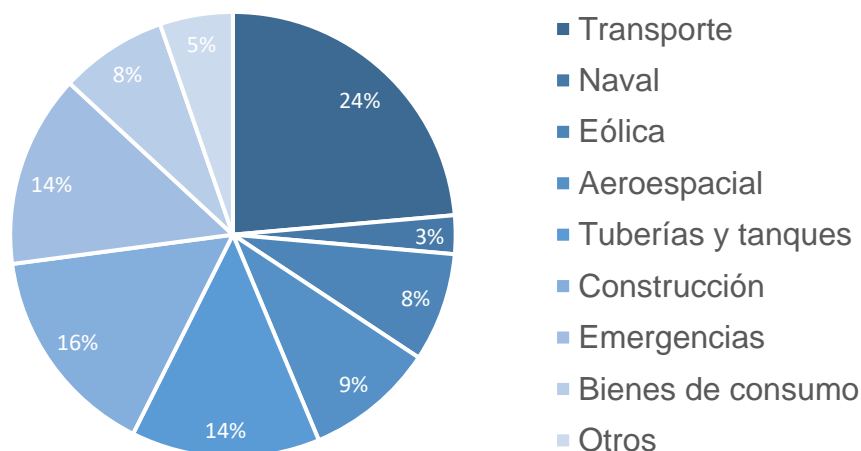


Figura 4. Porcentaje de uso de los materiales compuestos por sector.

6.2. Procesos de fabricación de PMC

Hoy en día existen diversos tipos de procesos de fabricación de PMC que dependen de la aplicación o uso que se le vaya a dar al material en cuestión. Entre los procesos más empleados caben destacar los que a continuación se desarrollan.

6.2.1. Moldeo por transferencia de resina

El moldeo por transferencia de resina, más conocido como RTM, es un proceso en el cual se inyecta resina a una temperatura determinada a través de uno o más conductos hasta el molde en el que se encuentran las fibras secas previamente colocadas, tal y como se muestra en el proceso esquematizado de la **Figura 5** [22]. Para evitar la oclusión de aire, éste se evacúa mediante válvulas de vacío. El proceso de llenado dura hasta que el molde queda completamente lleno de la resina inyectada. En este momento comienza el proceso de curado. El molde se calienta mediante resistencias incorporadas dentro del mismo y la resina se endurece mediante reticulación. Cuando el proceso de conversión ha llegado al punto deseado, el molde se abre y la pieza se saca. Previamente se añade al molde un producto desmoldeante para evitar la adherencia de la resina.

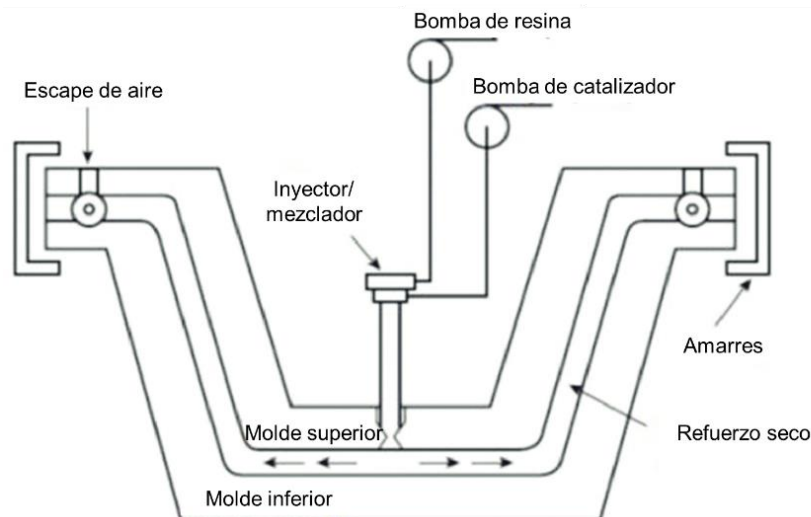


Figura 5. Diagrama del proceso de moldeo por transferencia de resina.

Parámetros como el patrón de flujo o la distribución de presiones en el molde tienen una gran importancia a la hora de asegurar la calidad de la pieza, es decir, evitar rechupes o tener un buen acabado superficial. Como estos factores

dependen de variables como la geometría de la pieza, el tipo de fibras o la colocación de los conductos de inyección de resina, convierten este proceso en un proceso caro si se quieren realizar tiradas cortas.

Sin embargo, la calidad superficial de las piezas, sus tolerancias dimensionales y sus propiedades mecánicas son realmente buenas, lo que lo convierten en un proceso atractivo para la producción en serie.

6.2.2. Infusión por vacío

Aunque existen diversas variantes de infusión por vacío, la base de todas ellas es un factor común, la presión. Todas las variantes se basan en la diferencia de presiones entre el suministro de resina y el vacío de la bolsa. A priori puede parecer que el RTM y la infusión por vacío son procesos similares, pero no lo son. La mayor diferencia que se da entre los dos procesos es el diseño de las herramientas y utillajes. El RTM cuenta con un molde dividido en dos mitades completamente rígidas para soportar la presión (mayor que la ambiente). Por el contrario, en el proceso de infusión, una de las dos mitades es sustituida por un film capaz de adaptarse a la otra mitad del molde y la presión que se ejerce se da por debajo de la presión ambiente [23]. El diagrama del proceso se puede ver en la **Figura 6**.

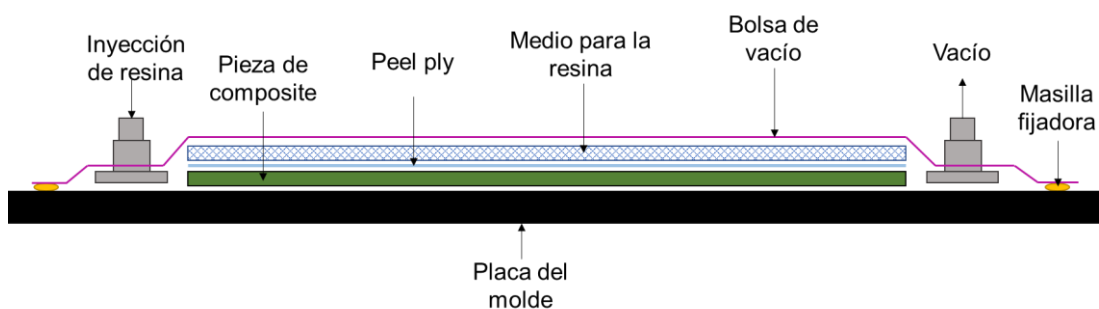


Figura 6. Diagrama del proceso de infusión por vacío.

6.2.3. Pultrusión

El proceso de pultrusión lleva siendo investigado desde los años 80 [24], realizándose modelos matemáticos del proceso con el fin de predecir la calidad de las piezas. Desde entonces este proceso no ha hecho más que ser innovado y desarrollado. Las aplicaciones de este proceso son mayoritariamente estructurales, ya que permite fabricar perfiles de composite con propiedades

mecánicas altas, lo suficiente como para fabricar puentes o elementos estructurales en aeronáutica. En la **Figura 7** se puede observar un esquema general del proceso de pultrusión.

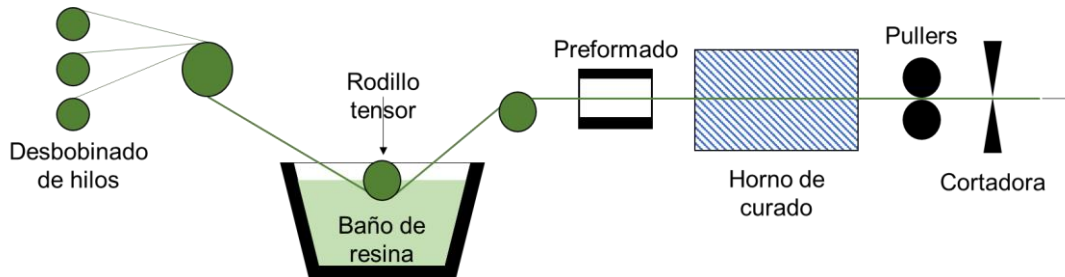


Figura 7. Diagrama del proceso de pultrusión en el que el material viaja de izquierda a derecha.

El proceso comienza con el desbobinado de las fibras de vidrio que son conducidas al baño de resina mediante guías y rodillos. Una vez mojadas en resina, las fibras son llevadas por un conducto con la forma del perfil deseada. Después, pasan por unos calentadores que curan la pieza y le dan la forma final. Mediante unos “pullers”, se tira de los perfiles hasta llevarlos a una cortadora que cortará los perfiles en las dimensiones especificadas por el cliente [25]. Es un proceso de fabricación continua muy válido para tiradas grandes. Sin embargo, su fabricación está limitada a perfiles estructurales. Cabe destacar que también existen variantes con curado UV para este proceso, como el desarrollado por Mondragon Unibertsitatea, permitiendo fabricar perfiles curvos curando inmediatamente después de pasar por el perfil y mediante el uso de un robot automatizado a modo de “puller” [26].

6.2.4. Filament winding

Cuando el composite requiere tener una forma para contener algún tipo de fluido, es decir, tener forma de tanque, se utiliza el proceso denominado “Filament winding”. Este proceso se basa en devanar un hilo de fibra continuo impregnado en resina alrededor de un eje con la forma del contenedor. Esto se consigue con la ayuda de un carro que se desplaza lateralmente y va posicionando los hilos donde sea necesario. En la **Figura 8** se puede observar el esquema de proceso, en el que las fibras fluyen de derecha a izquierda y son posicionadas en el mandril giratorio [27].

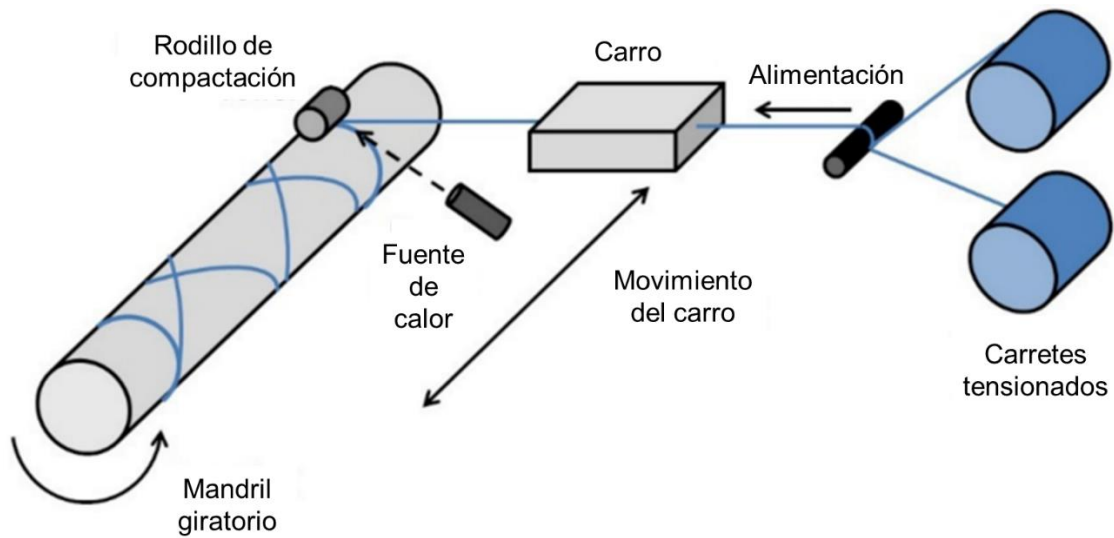


Figura 8. Esquema del proceso de "Filament winding".

6.2.5. Sheet Moulding Compound

Los SMC (Sheet Moulding Compound) son materiales compuestos en forma de lámina que se componen de elementos como resina y fibras u otros materiales troceados. Su proceso de fabricación se compone de dos fases principales, la composición y la maduración. En la primera la resina, la fibra troceada y el catalizador para su curado se mezclan y se depositan en un film transportador. Este film lleva la mezcla a través de unos cilindros de compactación que le dan el espesor especificado por el cliente. En la fase de maduración, las láminas se dejan curar lo suficiente como para que la viscosidad de la mezcla aumente hasta el punto en el que las láminas puedan ser manipuladas sin romperse. En la **Figura 9** se puede ver la esquematización del proceso de fabricación de SMC [28].

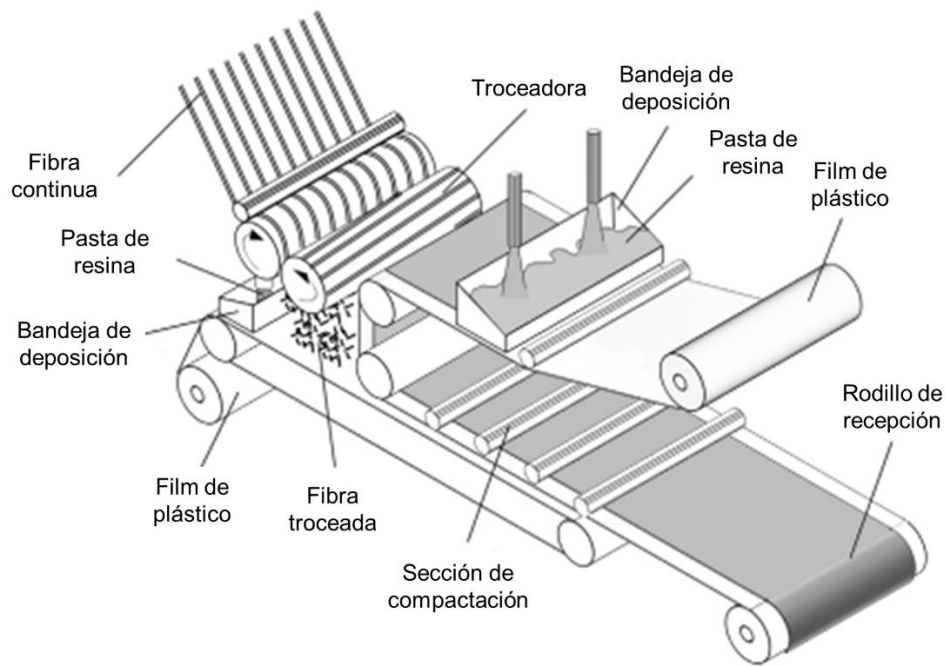


Figura 9. Esquema del proceso de fabricación de SMC.

6.2.6. Laminación manual

El proceso de laminación manual o “hand lay-up” (HLU) en inglés, es el proceso utilizado por las empresas fabricantes de piezas de composite de fibra de vidrio. Generalmente, son piezas que se emplean para barcos porque su tamaño no permite el uso de otros procesos. También se utiliza para piezas de vehículos de transporte no estructurales o que no requieran altas prestaciones mecánicas, como parachoques o embellecedores.



Figura 10. Imagen representativa del proceso de Hand lay-up en la que se puede ver a varios operarios impregnando tela de fibra de vidrio con rodillo.

Este método de fabricación de piezas de composite se basa en la colocación manual de telas tipo mat en un molde y mediante el uso de diversas herramientas manuales, como rodillos o brochas, se aplica la resina necesaria para que la tela quede pegada al molde. Se le añaden las capas necesarias según la aplicación futura de la pieza y se deja curar a temperatura ambiente. El curado de este tipo de piezas suele oscilar entre las 24 y 48 h [29], con curados de 24h a temperatura ambiente y post curados de 16h a temperatura elevada [30]. Esto conduce a tiempos de ciclo realmente altos y lo convierte en un proceso no apto para la fabricación en serie. Aun así, se hace uso de él porque requiere inversiones mínimas y eso se traduce en menores costes de pieza, además de que el coste de la mano de obra es bajo.

6.2.7. UV drape forming

El proceso que se ha utilizado en este trabajo es una adaptación del Hot Drape Forming (HDF). Este proceso se basa en la utilización de una prensa de membrana para ejercer presión sobre un molde y compactar los preimpregnados, creando así la pieza deseada. En la **Figura 11** se muestra de forma esquemática el proceso de HDF.

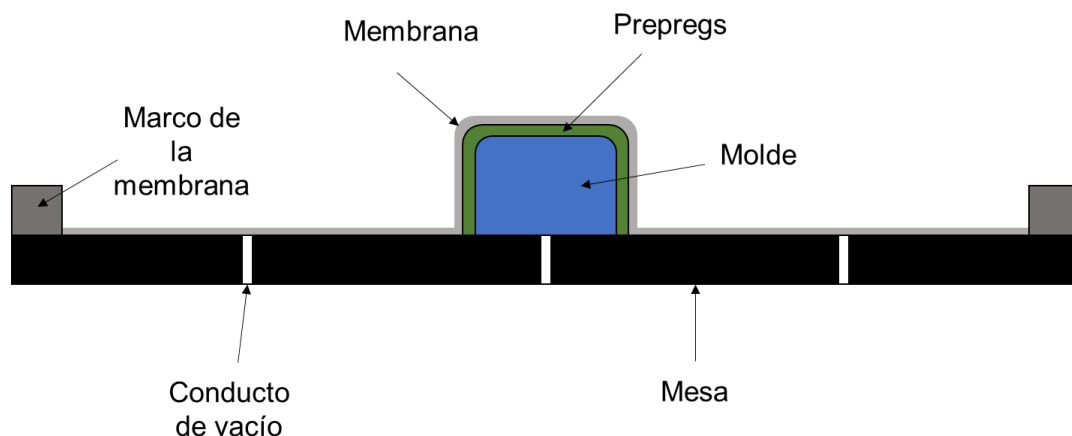


Figura 11. Representación esquemática del proceso por prensa de membrana HDF.

Se coloca el molde, que tiene la forma de la pieza a fabricar, en la mesa de formación y, tras aplicar desmoldeante y gelcoat al molde, se colocan los preimpregnados. Seguido, se cierra el marco de la membrana y se le aplica vacío mediante los conductos que la propia mesa posee. La membrana, al ser de

silicona, se adapta a la forma del molde compactando así los preimpregnados y dándoles la forma de la pieza.

La adaptación del proceso se debe a que las prensas de membrana comerciales suelen incorporar unas resistencias en la tapa superior para generar calor y así acelerar el proceso de curado, pero en el caso de este trabajo, este horno (**Figura 12**) solo ha sido necesario para dilatar la membrana y mejorar la adaptación de ésta al molde puesto que el curado se ha realizado mediante luz UV.

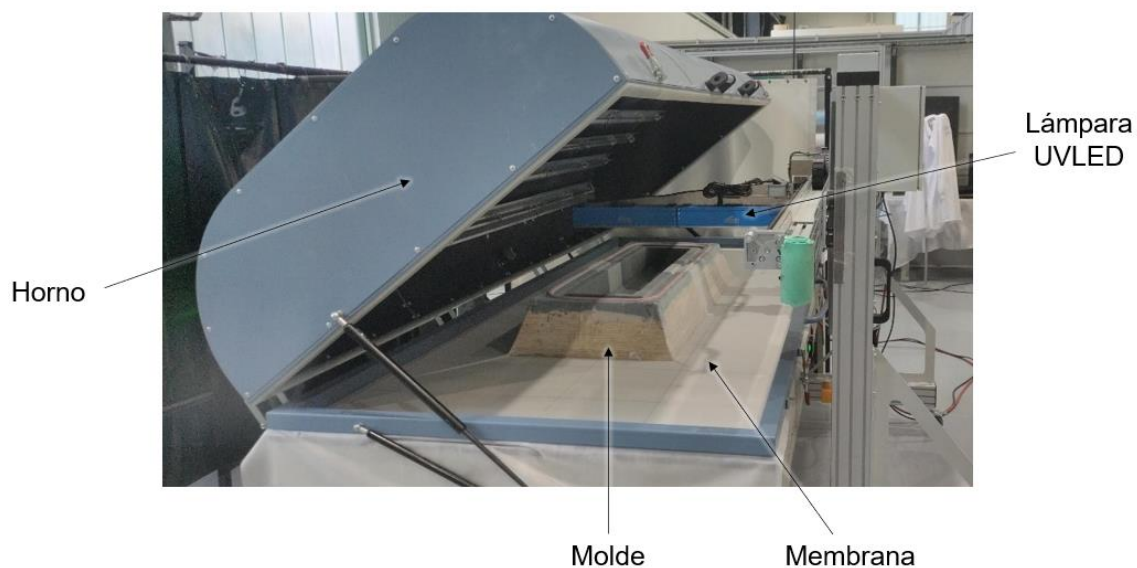


Figura 12. Proceso de UV drape forming.

6.3. Métodos de curado

Los composites fabricados con resina requieren del curado de ésta para obtener las propiedades que los definen. Tal y como ya se ha mencionado, existen diferentes tipos de curado tales como curado ambiente, por temperatura y UV.

6.3.1. Curado a temperatura ambiente

El curado a temperatura ambiente es el método que se utiliza actualmente para fabricar las piezas de composite de fibra de vidrio. Se basa la mezcla de la resina con un catalizador y en dejar que la reacción ocurra a temperatura ambiente el tiempo que sea necesario, el cual puede llegar incluso a las 48h, como se ha

explicado en el apartado 6.2.6. Como no requiere de ningún tipo de maquinaria especial, la inversión necesaria para hacer uso de este proceso de curado es muy baja, lo que hace que las piezas finales sean relativamente baratas.

6.3.2. Curado por temperatura

El curado por temperatura sigue el mismo principio de curado que el curado ambiente, solo que los tiempos de curado disminuyen al aplicar temperaturas elevadas. Este proceso, a pesar de ser más rápido, es energéticamente menos eficiente ya que requiere grandes cantidades de energía para conseguir la temperatura deseada, encareciendo así las piezas finales.

6.3.3. Curado por haz de electrones

Dentro de los curados de alta velocidad se puede encontrar el curado por haz de electrones. El principio es similar al curado UV que se verá a continuación, se irradia el sustrato que contiene un iniciador especial con un haz de electrones de manera que los enlaces del iniciador se rompen, creando radicales libres que inician la reacción y curan mediante reticulación. Este método de curado tiene tiempos de curado muy cortos [31].

6.3.4. Curado por ultravioleta

Este curado, en comparación con los dos anteriores, es muchísimo más veloz y energéticamente mucho más eficiente. Se consigue añadiendo un fotoiniciador y otros aditivos a la resina, haciéndola curable con luz UV. El tiempo de curado se reduce drásticamente, de horas o incluso días a minutos, lo que permite aumentar la cadencia, reduciendo así los costes asociados a la pieza. Hoy en día, con el desarrollo de lámparas UVLED, el gasto energético es bajo en comparación con el curado por temperatura. El mecanismo de polimerización por radiación UV es el siguiente (**Figura 13**) [32]:

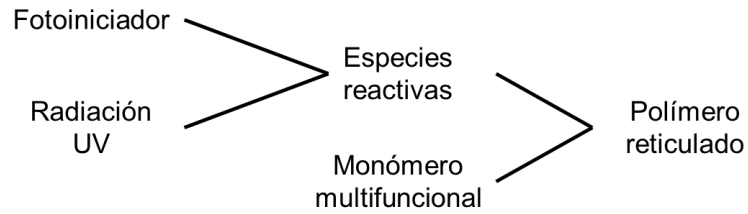


Figura 13. Esquema de la reacción del mecanismo de polimerización por radiación UV.

Como se puede ver en la **Figura 14**, cuando el fotoiniciador es irradiado con luz UV en la longitud de onda correspondiente a la de su activación, la radiación absorbida rompe el enlace entre el grupo carbonilo y el carbono adyacente creando así radicales libres que ayudan a la creación de las cadenas poliméricas que se forman durante el curado [33], [34].

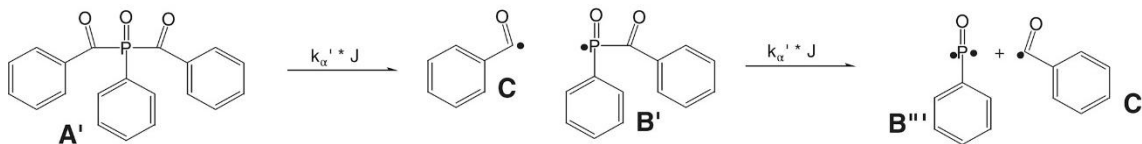


Figura 14. Cinética del proceso de polimerizado del fotoiniciador.



7. Metodología experimental

Con el fin de cumplir los objetivos listados en el apartado 3, se ha hecho uso de diferentes materiales, equipos y técnicas de caracterización que se describen a lo largo de este apartado.

7.1. Materiales

7.1.1. Fibras mat

Las telas mat son telas compuestas por filamentos de fibra de vidrio de longitudes de alrededor de 5 cm aglomerados con resina en polvo. Existen de diferentes gramajes, pero los utilizados en este trabajo han sido de 225 y de 300 g/m², que son los más usados en fabricación de piezas de fibra de vidrio.

7.1.2. Resina

La resina, como se ha mencionado anteriormente, tiene una formulación patentada por IDEKO. Se basa en la resina de poliéster con la adición de un fotoiniciador. Junto con otros elementos incluidos en la formulación se consigue una resina que se mantiene líquida hasta que se le aplica luz UV.

7.1.3. Fotoiniciador

El fotoiniciador utilizado ha sido el fotoiniciador bis (2,4,6-trimetilbenzoil)-fenilfosfano (BAPO), de nombre comercial Irgacure® 819.

7.1.4. Gelcoat

El gelcoat es una resina modificada que se aplica como primera capa en procesos de fabricación de piezas de fibra de vidrio. El gelcoat confiere un acabado superficial de alta calidad a las piezas. En el caso de este proyecto se utiliza un gelcoat de color blanco del fabricante Polynt Composites.

7.2. Equipamiento

7.2.1. Máquina de fabricación de prepregs

Para fabricar las piezas de composite, se parte de preimpregnados fabricados con una máquina prototipo diseñada por IDEKO, la cual se muestra en la **Figura 15**. Esta máquina sigue el método de impregnación por rodillo en el que un rodillo impregnado con una película de resina, al contactar con las telas, las moja. La máquina consta de 3 partes principales; desbobinado, impregnación y bobinado.

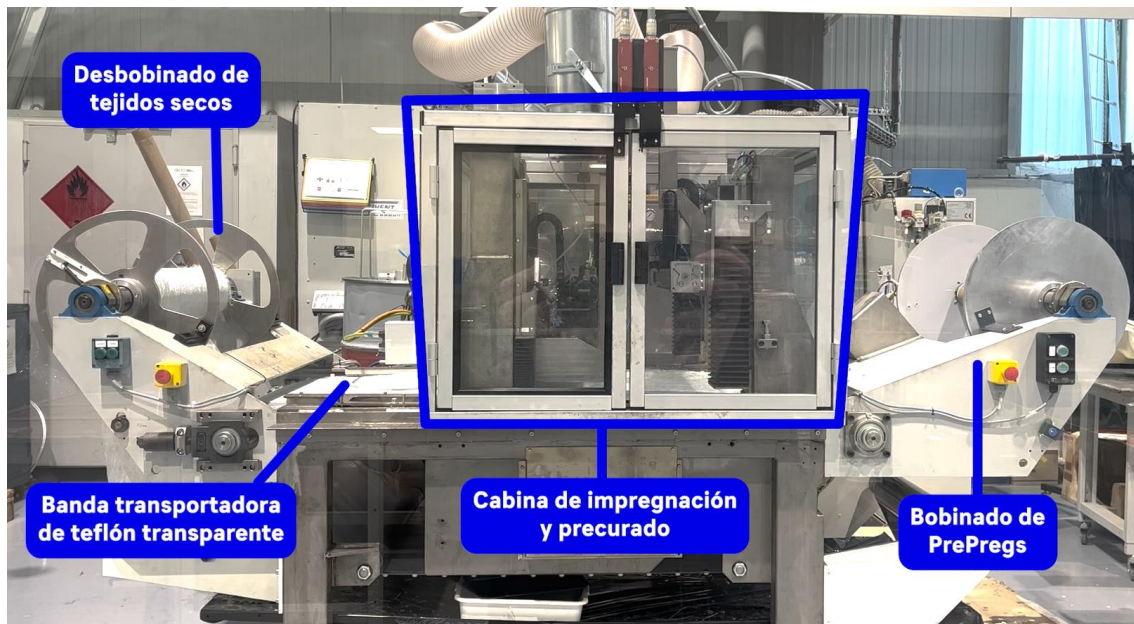


Figura 15. Máquina de fabricación de preimpregnados de curado UV. Se muestran de izquierda a derecha las 3 fases mencionadas; desbobinado, impregnación y bobinado.

En la parte de desbobinado (**Figura 16**), las bobinas de la tela que se quiera utilizar son cargadas en un eje neumático (que se ajusta al diámetro interior de la bobina) y colocadas en los anclajes del motor. Una vez en marcha el proceso, un láser mantiene constante la altura de la comba que se genera, de forma que no se dan tirones y se evita que la tela se rompa. Para mantener centrada la tela, se implementaron unas guías que permiten centrar completamente la tela en la banda. Las telas son llevadas mediante esta banda de teflón transparente hasta el rodillo de impregnación y, para evitar manchar la banda, se coloca un plástico transparente debajo. Es necesario que el plástico sea transparente por motivos que se explican en la parte de impregnado.

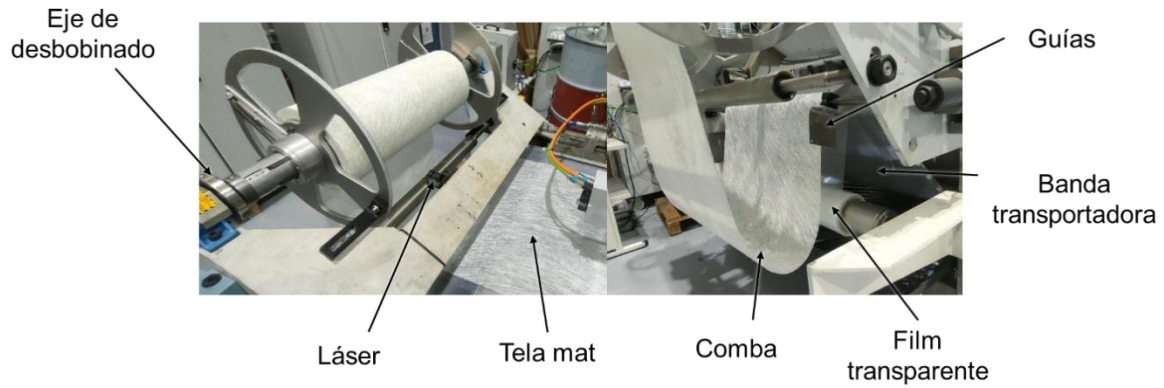


Figura 16. Parte de desbobinado de la máquina de fabricación de preimpregnados.

En la parte de impregnado (**Figura 17**), la banda lleva la tela junto con el plástico transparente hasta en rodillo de impregnación. El sistema de impregnación está compuesto por unas boquillas encargadas de suministrar la resina, una bañera que se mantiene casi en contacto con el rodillo, el cual gira a la misma velocidad que la banda, y unas lámparas UV que precuran la resina para darle la consistencia necesaria para poder manipular las telas cómodamente a la hora de introducirlas en el molde.

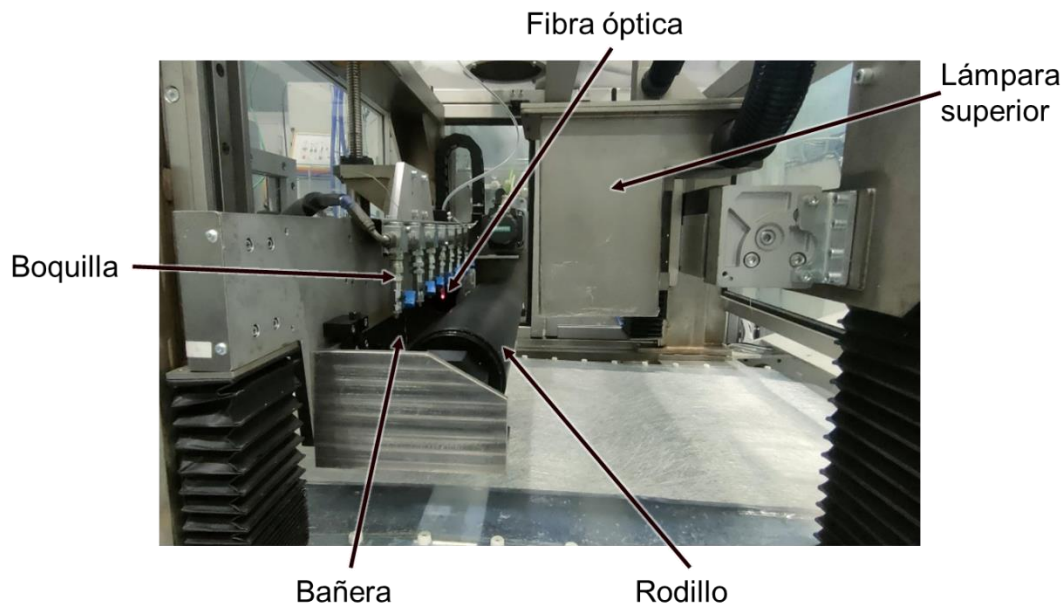


Figura 17. Parte de impregnación de la máquina de fabricación de prepreps.

Cuando el sistema está en marcha, el rodillo es aproximado a la tela y las boquillas comienzan a suministrar la resina. La bañera es aproximada al rodillo de forma que queda una pequeña hendidura de una distancia que varía según qué porcentaje de fibra se quiera en el preimpregnado. El nivel de resina en la

bañera es controlado por un sensor de fibra óptica colocado a una altura determinada para evitar el desbordamiento. El rodillo gira a la misma velocidad que la banda transportadora y comienza a impregnar las telas. Como se ha mencionado anteriormente, la resina es líquida a temperatura ambiente, por lo que para asegurar una mínima adherencia de la resina a la tela después de impregnarla y que esta sea manipulable, se le hace un precurado mediante unas lámparas UV que hacen barridos laterales, tanto por encima como por debajo. El plástico transparente deja pasar esta luz, permitiendo el precurado. Estas lámparas están programadas a un porcentaje de su capacidad total puesto que solo se le pretende dar algo de consistencia a la resina, permitiendo que se agarre a la tela, y no curarla del todo, ya que un curado total no permitirá moldear la lámina de preimpregnado generada.

Finalmente, a la parte de bobinado (**Figura 18**), cuyo funcionamiento es similar al del desbobinado, llega el preimpregnado con la consistencia suficiente para que la resina no se desprenda de la tela. En esta zona, las telas se bobinan en un eje controlado de la misma manera que el desbobinado, un láser apunta a la comba y varía la velocidad de bobinado del motor en función de la distancia, de esta manera se evitan tirones. La diferencia entre la parte del desbobinado y el bobinado es el uso de un film negro, este film se coloca para evitar que la luz UV natural siga curando la resina y así poder conservar las telas para su uso futuro.

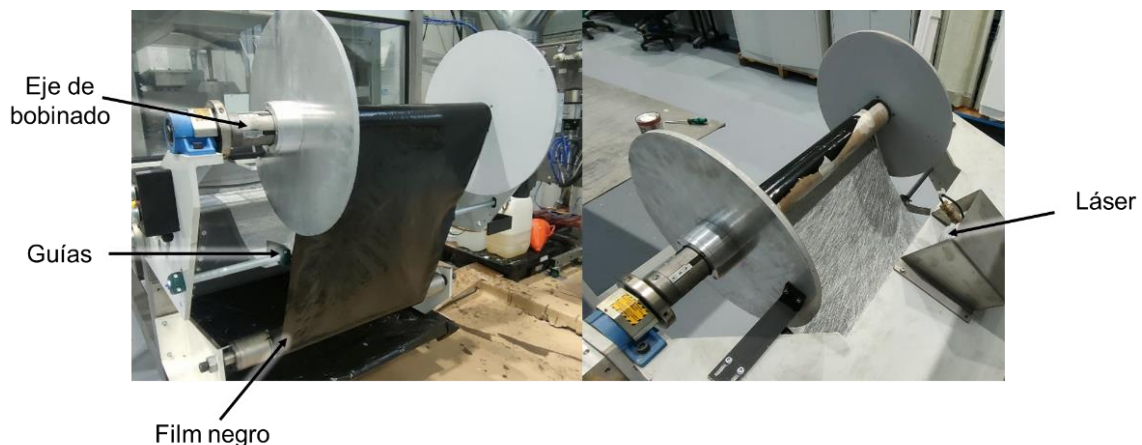


Figura 18. Parte de bobinado de la máquina de fabricación de preimpregnados.

7.2.2. Prensa de membrana

Para la fabricación de las piezas a partir de preimpregnados de curado UV, se utiliza la prensa de membrana mostrada en la **Figura 19**. El nombre del proceso utilizado en esta máquina es Hot Drape Forming (HDF), ya explicado en el apartado 6.2.5, que se basa en el uso de una membrana de silicona translúcida junto con vacío para la compactación de los preimpregnados en el molde. Este tipo de prensas están pensadas para el curado por temperatura, por ello cuentan con un horno en la parte superior, el cual puede cerrarse herméticamente. Es una formadora de la empresa GLOBAL capaz de generar -1 bar de presión de vacío. También es posible intercambiar la membrana por una más fina o gruesa, según las necesidades del proceso.

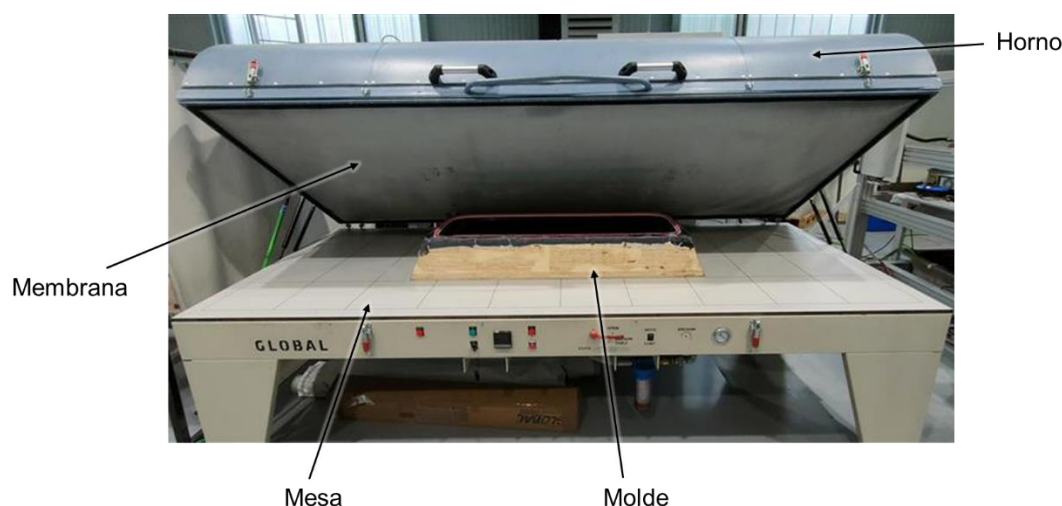


Figura 19. Prensa de membrana de GLOBAL.

7.2.3. Moldes

Los moldes utilizados en este trabajo han sido proporcionados por empresas relacionadas con el sector de la automoción, concretamente en el ámbito de fabricación de autobuses. Se ha trabajado con dos moldes diferentes, pero se ha centrado el trabajo en el molde 1.

El molde 1 era un embellecedor colocado en el interior de los autobuses para tapar elementos estructurales. El molde 2 cumple el mismo objetivo, pero oculta un elemento estructural hacia el exterior. La estructura de ambos moldes se presenta en la **Figura 20**.



Figura 20. Arriba el molde 1. Abajo el molde 2.

7.2.4. Lámpara de curado UV

Para el proceso de curado de la pieza se ha utilizado una lámpara de luz UV. Esta lámpara está compuesta por dos líneas de UVLED altamente intensivo de la marca HÖNLE y modelo LEDLINE500 de 15x500 mm, de forma que crean una línea led de 15x1000 mm. Esta línea está implantada en una estructura con railes (**Figura 21**) que desplazan las lámparas de forma lateral mediante el uso de neumática. El rango del barrido es controlable mediante un PLC (Controlador Lógico Programable) acoplado a la propia estructura.

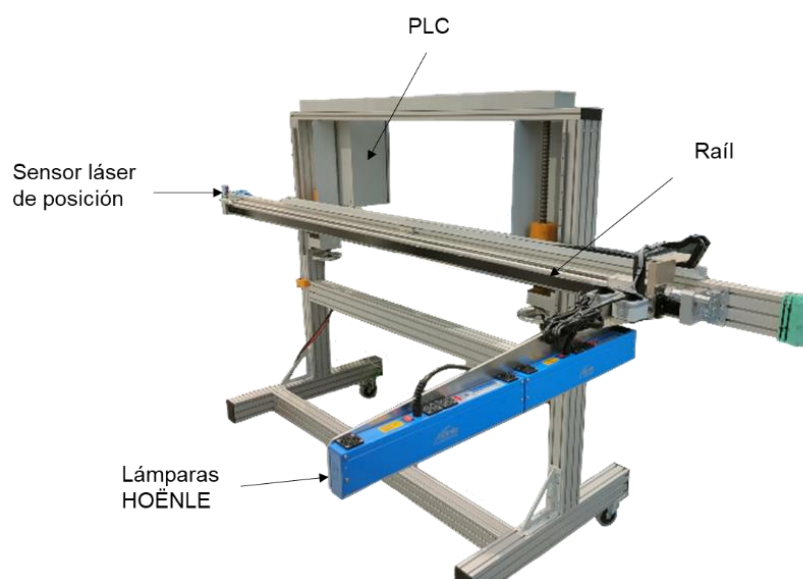


Figura 21. Lámpara utilizada en el proceso de curado UV. Formada por dos lámparas HÖNLE LEDLINE500.

7.3. Técnicas de caracterización

7.3.1. Porcentaje en fibra

El PCF de los preimpregnados fabricados se ha caracterizado mediante pesada. Cada vez que se realiza un ensayo se cortan 3 muestras de 10x10 cm en las dos zonas laterales y la central por cada metro fabricado, de forma que se puede obtener una población suficiente como para realizar un análisis estadístico de la repetitividad de la máquina. Cada muestra es pesada en una báscula KERN ALJ, mostrada en la **Figura 22**, con una resolución de 0,01 mg. El cálculo del porcentaje en fibra se realiza dividiendo el peso de la tela (W_{tela}) correspondiente al área de esas dimensiones entre la resta entre el peso total (W_t) y el peso de los plásticos protectores ($W_{Plásticos}$), y cuya expresión matemática se muestra mediante la ecuación 1. El resultado presentado corresponde a una medida tomada para el mat 225:

$$PCF = \frac{W_{tela}(g)}{(W_t - W_{Plásticos})(g)} \cdot 100 = \frac{2,25}{(7,3 - 0,96)} \cdot 100 = 35\% \quad (1)$$

El peso de los plásticos protectores se ha considerado constante puesto que se trata del mismo tipo y fabricante de plásticos para cada ensayo.



Figura 22. Báscula de precisión KERN ALJ.

7.3.2. Medición de la irradiancia

Para obtener la caracterización de la lámpara y conocer la emisión de la irradiancia en función de la distancia y posición horizontal, se ha utilizado un sensor proporcionado por el mismo fabricante que la propia lámpara. El sensor es un UV-Meter de HÖNLE, el cual se muestra en la **Figura 23**.



Figura 23. UV-Meter de HÖNLE.

7.3.3. Medición del tiempo de curado

La medida del tiempo de curado de los prepreps se ha realizado mediante un sensor DEA (DiElectric Analysis). Este sensor mide la permitividad y la conductividad que surge de la corriente iónica y la rotación de los dipolos del material **Figura 24** [35].

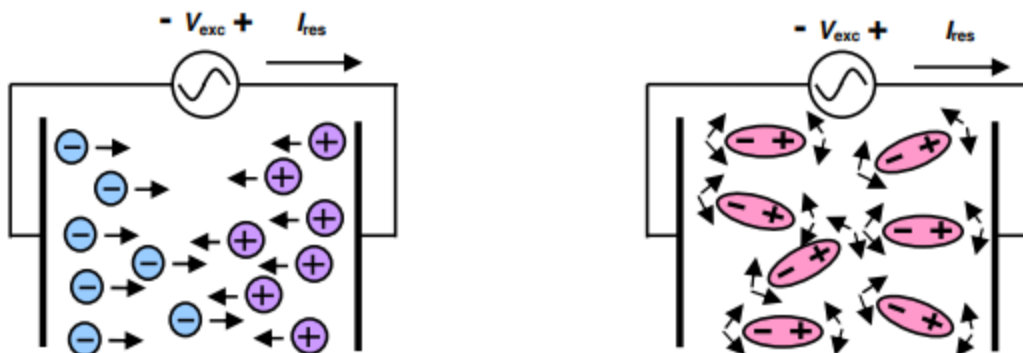


Figura 24. Movimiento de los iones y rotación de los dipolos de un material.

En el caso de un polímero, el parámetro que se observa para medir el grado de curado es la viscosidad iónica. La viscosidad iónica aumenta con relación al aumento en la viscosidad física del polímero.

Cuando el material está completamente curado, la medición de la viscosidad iónica será constante. En la **Figura 25** puede verse un ejemplo de la gráfica proporcionada por el DEA:

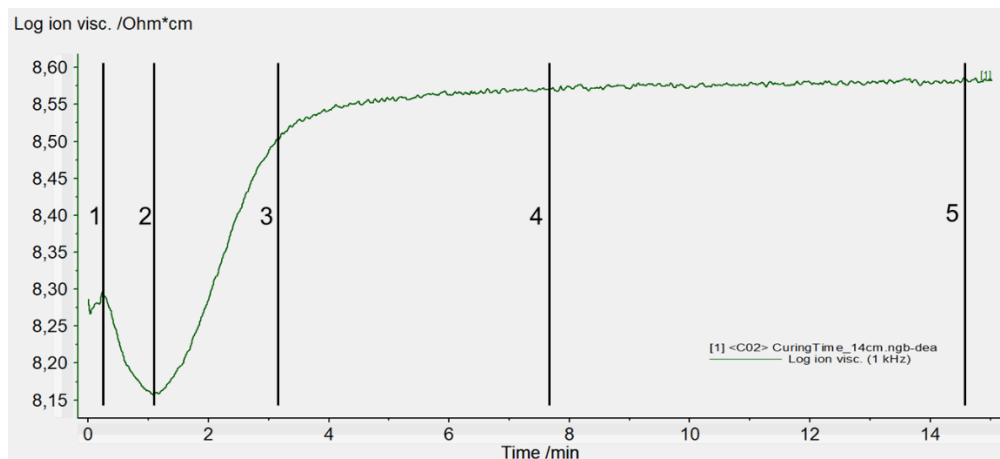


Figura 25. Gráfica de una medición del tiempo de curado. 1) Inicio de la medición, 2) Inicio de curado, 3) Ralentización de la reacción, 4) Aproximación a "plateau" y 5) Curado total.

El tiempo curado total está determinado desde la línea 2 hasta la 5, es decir, desde que se inicia la reacción hasta que la viscosidad iónica es constante.

7.3.4. Caracterización de piezas

A la hora de verificar si el espesor de la pieza es homogéneo, es necesario realizar las mediciones de éstos. Para ello, se han cortado las piezas en secciones mediante el uso de una sierra manual y se ha medido su espesor en 16 zonas aleatorias utilizando un calibre.

7.4. Descripción del proceso de fabricación de piezas

El proceso comienza con la elección de la bobina de la tela que se quiera utilizar. Tras realizar las preparaciones de máquina pertinentes se comienza el proceso de impregnado de las telas. Una vez impregnadas, las telas son bobinadas para su posterior uso a la hora de fabricar las piezas (**Figura 26**).

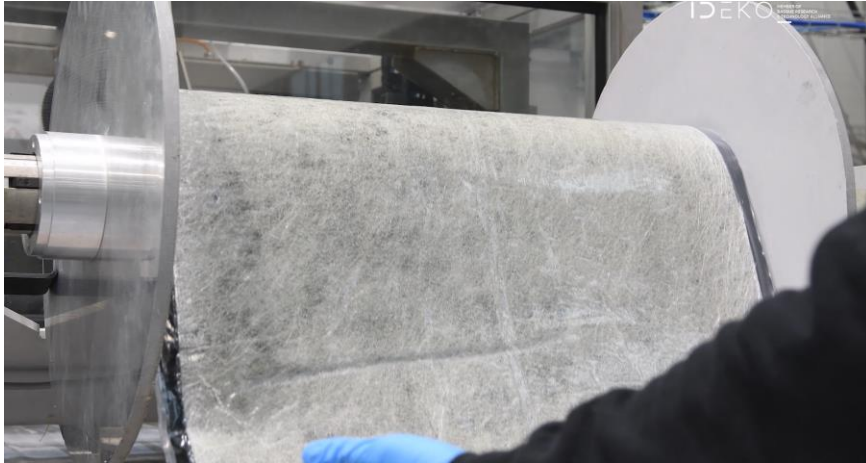


Figura 26. Desbobinado de preregs.

Una vez obtenido el prepeg, es hora de fabricar las piezas. Para ello, se elige el molde de la pieza a fabricar y se le aplica desmoldeante con el fin de evitar adherencias. Tras ello, se le aplica una capa de gelcoat blanco (**Figura 27**) que le dará un buen acabado superficial a la pieza final. El gelcoat debe dejarse al menos 8h colocado para que haya reticulado lo suficiente como para poder colocar los preregs sobre él. El siguiente paso es colocar los preimpregnados. Para ello, partiendo de la bobina almacenada anteriormente, se coge el prepeg necesario y se corta la forma adecuada para su mejor colocación. A la hora de colocar los preimpregnados, los dos plásticos protectores son retirados y el prepeg es colocado con el mejor ajuste posible. Se colocan un número de capas determinadas en función de las especificaciones de cliente. Como la colocación de los preimpregnados es un proceso totalmente manual, el “know how” y la experiencia del operario tendrán un impacto a la hora de minimizar los errores de proceso.



Figura 27. Gelcoat aplicado.

Tras haber colocado los prepregs en el molde (**Figura 28**), éste se coloca en la mesa de la prensa de membrana. Este proceso hace uso de utillajes de fibra de vidrio fabricados en el propio taller y que han sido barnizados y aplicados con desmoldeante previamente para evitar adherencias. Estos utillajes son colocados sobre los prepregs para ayudar a la membrana a la hora de compactar. Una vez colocados los utillajes se cierra el marco de la membrana y se le aplica el vacío. La membrana se adaptará a la pieza y presionará los prepregs cerciorándose de que se adapten correctamente a la forma del molde y por tanto de la pieza.

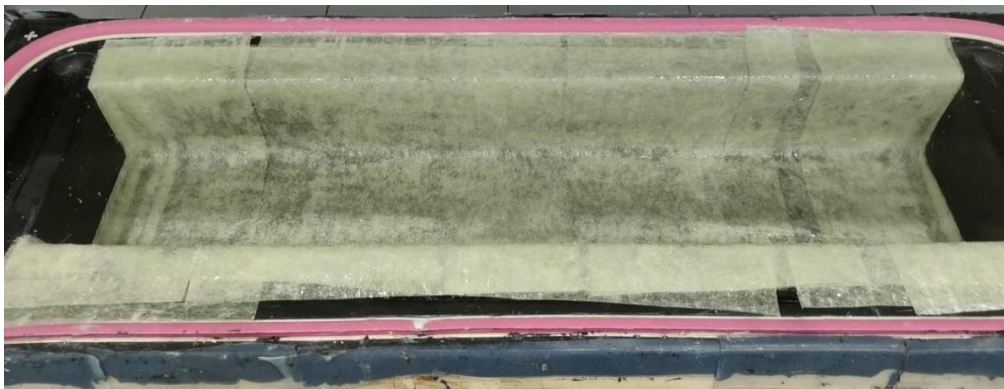


Figura 28. Prepregs colocados en el molde.

A continuación, se coloca la lámpara UV presentada en la **Figura 21** sobre la pieza compactada y se procede a hacer barridos laterales a lo largo de la pieza. El tiempo de curado variará en función de la pieza y su geometría.

Finalmente, cuando haya pasado el tiempo necesario para el curado total de la pieza, se libera el vacío y se abre el marco de la membrana. Después, se quitan los utillajes y finalmente se saca la pieza final (**Figura 29**).



Figura 29. Pieza final fabricada a partir del molde 1.

7.5. Descripción de las fases de investigación

A continuación, se describen las fases de investigación y los aspectos del proceso que se han desarrollado en cada una de ellas con el fin de optimizar el proceso completo.

7.5.1. Fase 1: Fabricación de prepregs

En la fase de fabricación de prepregs se ha trabajado la funcionalidad de la máquina prototipo. Tras una mejora en el diseño de la máquina, era necesario analizar el funcionamiento de esta, el cual es determinado por 4 parámetros; e , d , T y v , los cuales pueden observarse en la **Figura 30**:

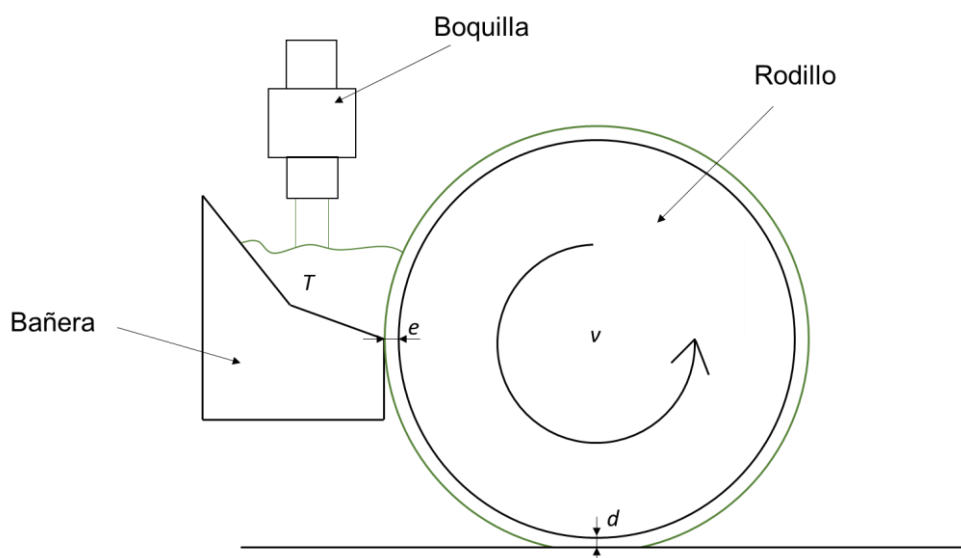


Figura 30. Esquema de la impregnación de telas mediante rodillo.

El parámetro “ e ” representa la abertura entre la bañera y el rodillo, el cual da lugar al espesor de la película formada en la superficie del rodillo. El parámetro “ d ” representa la distancia del rodillo desde su punto más bajo hasta la parte plana y rígida de la máquina por la cual se desliza la banda donde se sitúa la tela mat. El parámetro “ T ” es la temperatura a la que se encuentra la resina en la bañera. Temperaturas altas contribuirán a una mejor impregnación, pero a su vez a una película de resina menos consistente, por lo que los resultados pueden variar. Finalmente, la velocidad “ v ” determina la velocidad de fabricación. Para obtener un modelo que determine el porcentaje de fibra del prepreg en base a estos cuatro parámetros, se han realizado ensayos de fabricación en los que se han alterado los parámetros y medido la relevancia de su variación.

7.5.2. Fase 2: Uso de moldes

En esta fase se ha desarrollado el diseño de la adaptación del molde en el que se colocan los prepregs. Los moldes deben ser modificados para el proceso de forma, de tal manera que éstos no puedan dañar la prensa de membrana. Por ello, se han establecido unos criterios de adaptación en base a lo observado a la hora de fabricar las piezas.

7.5.3. Fase 3: Compactación y curado

En la fase 3 se han desarrollado dos aspectos primordiales del proceso: la compactación de la pieza y los tiempos de curado del proceso. Para el primer aspecto se han diseñado utillajes que ayuden a la membrana a compactar los preimpregnados. Además, se han probado membranas de diferente grosor. Para el segundo, se ha desarrollado un modelo matemático capaz de predecir el tiempo de curado de la pieza según su geometría y distancia respecto a la lámpara.

7.5.4. Fase 4: Obtención de la pieza final

En la fase 4 se ha trabajado la calidad de la pieza. Este resultado está ligado a todo el proceso en general, desde la fabricación de un prepreg con los criterios establecidos hasta el correcto compactado y curado de la pieza. Sin embargo, solo en esta fase se han medido las características de las piezas con el fin de dar “feedback” a las demás fases.

8. Resultados y discusión

Después de obtener los datos experimentales necesarios, estos han sido procesados y tratados con el fin de obtener los resultados marcados en los objetivos. Los resultados han sido ordenados, como ya se ha indicado, por fases del proceso.

8.1. Resultados de la Fase 1: Fabricación de prepregs

El objetivo de esta fase era comprobar cómo afectaban los parámetros de distancia, abertura, temperatura y velocidad al PCF. Sin embargo, como el análisis del impacto de cada uno de los parámetros requiere de mucho tiempo, se establecieron por ahora la temperatura y a velocidad como constantes. De esta manera, se realizó un primer ensayo en el que se definieron 10 condiciones de d y e diferentes y se fabricaron 5 m de prepreg en cada una de ellas. Esto se realizó tanto para el mat 225 como para el mat 300. La definición de las condiciones fue basada en trabajos anteriores en los que se habían realizado algunas pruebas con la versión antigua de la máquina.

Tabla 3. Resultados de la primera prueba para los dos gramajes de tela mat.

	Condición	e (mm)	d (mm)	PCF Promedio	Desviación media
mat225	1	0,5	0,5	42%	5%
	2	0,5	0,7	47%	4%
	3	0,5	1,1	50%	3%
	4	0,6	0,9	39%	2%
	5	0,6	1,1	40%	2%
	6	0,6	1,3	41%	2%
	7	0,7	0,7	31%	2%
	8	0,7	0,9	29%	1%
	9	0,7	1,3	31%	2%
	10	0,7	1,5	31%	1%
mat300	1	0,7	0,9	40%	2%
	2	0,7	1,1	41%	1%
	3	0,7	1,3	41%	1%
	4	0,8	0,7	38%	2%
	5	0,8	0,9	37%	1%
	6	0,8	1,1	38%	1%
	7	0,9	0,7	33%	1%
	8	0,9	0,9	32%	1%
	9	0,9	1,1	31%	1%
	10	0,9	1,3	32%	0%

La homogeneidad en la impregnación de las condiciones 1, 2 y 3 para mat225 no fue correcta. El prepreg presentaba zonas sin impregnar y la desviación en las medidas fue demasiado alta, por lo que se ha decidido invalidar los resultados.

Como se puede observar en la **Tabla 3**, el PCF parece variar únicamente con la abertura de la bañera. El parámetro de distancia afecta a la homogeneidad en el impregnado, si es demasiado grande la impregnación no será correcta y si es demasiado pequeña se generará “backflow”, fenómeno que ocurre cuando la cantidad de resina que se intenta impregnar es mucho mayor que la que la tela es capaz de recibir a una distancia determinada y se basa en la generación de un charco de resina en la parte posterior del rodillo, el cual modifica el PCF de forma heterogénea. Por ello, se ha establecido el valor de “e” como condicionante principal dentro de un rango de “d” entre 0,9 y 1,3 mm, como puede observarse en la **Figura 31**.

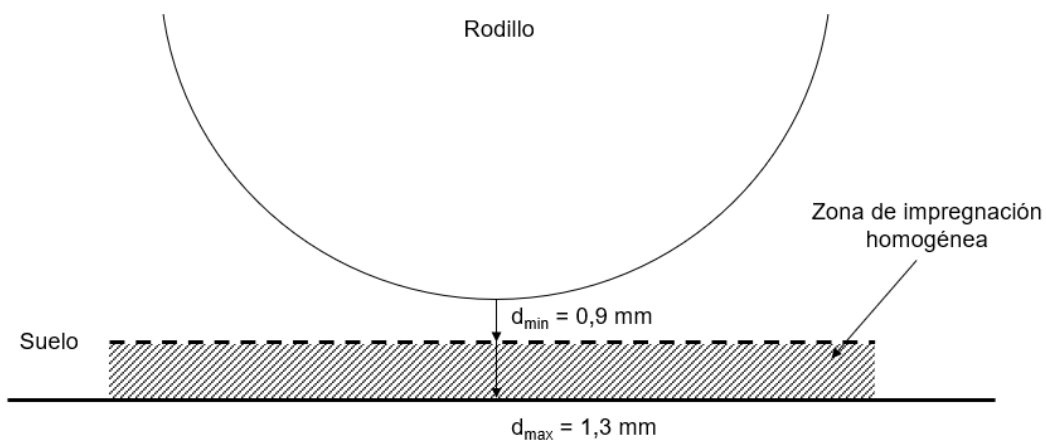


Figura 31. Rango de distancia en la que la impregnación es homogénea.

Una vez establecido el rango de distancia y establecida una variable, se ha procedido a obtener un modelo que relacione el PCF con la abertura de la bañera. Esto se ha conseguido realizando 3 tiradas de prepregs diferentes de 30 m cada una para cada abertura y de ellas se han extraído muestras en 3 zonas diferentes, concretamente en los lados y el centro, con una separación de 1 m entre las zonas (**Figura 32**).

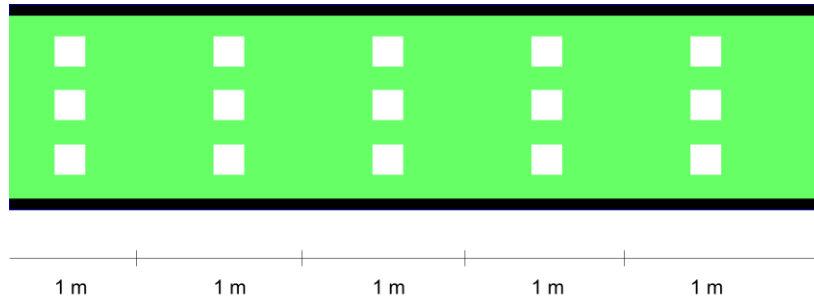


Figura 32. Representación gráfica del muestreo recogido del prepeg.

De esta manera, se obtienen 90 muestras por cada tirada, lo que resulta en una población de 270 muestras por cada abertura. En la **Tabla 4** se muestran los datos obtenidos para mat 225 y mat 300:

Tabla 4. Resultados obtenidos de los diferentes ensayos variando el parámetro e . Se ha obtenido el promedio con su correspondiente desviación estándar.

Mat 300			Mat 225		
Abertura (mm)	PCF Medio	Desviación media	Abertura (mm)	PCF Medio	Desviación media
0,7	41,9%	2,67%	0,6	41,0%	2,21%
0,8	35,4%	2,72%	0,7	32,8%	1,43%
0,85	32,1%	1,43%	0,8	27,8%	1,37%
0,9	29,4%	1,44%	0,91	23,1%	1,05%

Estos ensayos han sido realizados a una $d = 1,1$ mm en su mayoría y se han realizado otros modificando la d dentro del rango especificado con el fin de cerciorarse de que la afirmación de que la distancia no tiene impacto sobre el PCF siempre que esté dentro de ese rango es cierta. A partir de los datos de la tabla anterior se pueden construir curvas que modelicen el PCF en función de la abertura de la bañera (**Figura 33**):

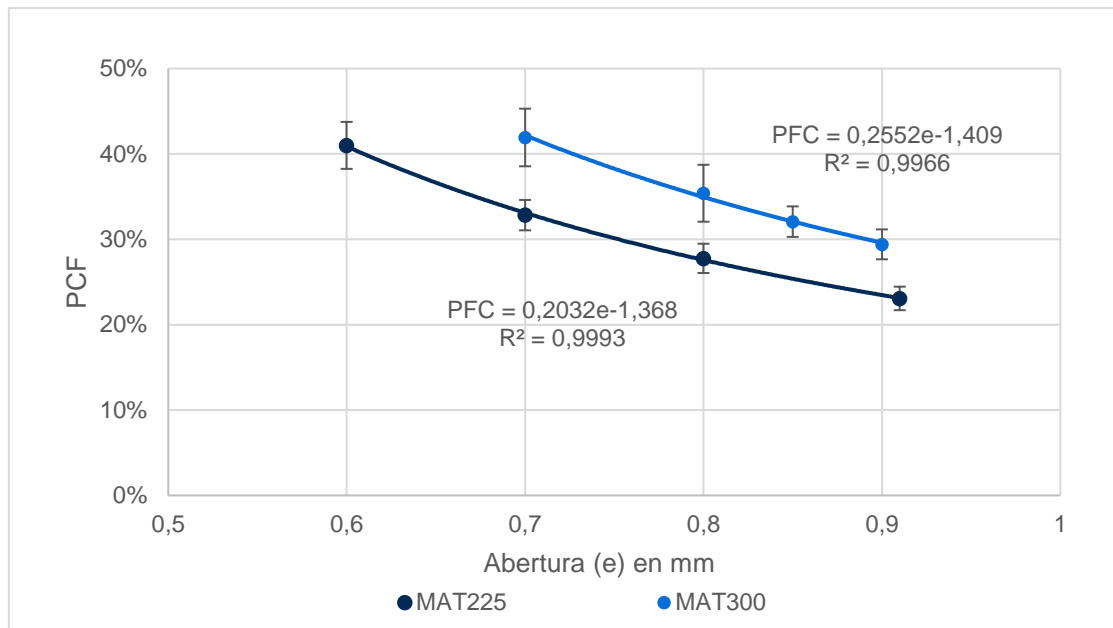


Figura 33. Ensayos a una temperatura entre 35 y 40 °C. Valores de distancia (d) comprendidos entre 0,9 y 1,3 mm. Entre estos valores el porcentaje en fibra no varía en función de la distancia sólo de la abertura (e).

Mediante una regresión potencial se han obtenido las ecuaciones que describen el funcionamiento de la máquina según el parámetro de la abertura de la bañera y dentro del rango de distancia establecido.

Como se ha explicado anteriormente, la temperatura es también un parámetro importante a tener en cuenta, ya que, influye sobre la viscosidad de la resina, la cual juega un papel esencial a la hora de crear la película que impregna las telas.

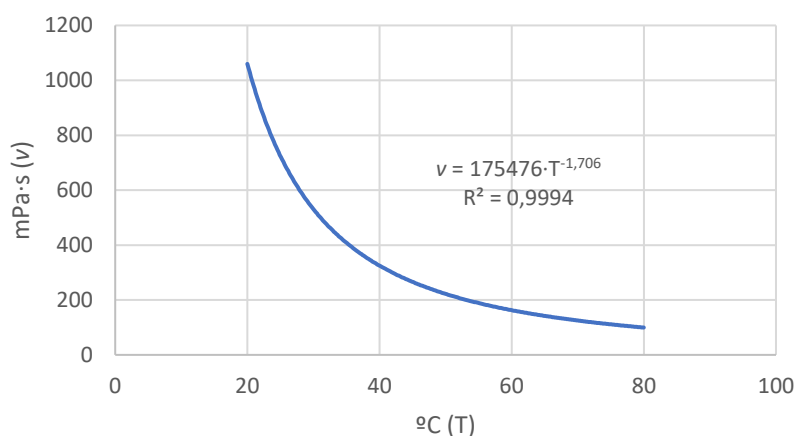


Figura 34. Relación entre la viscosidad y la temperatura de la resina utilizada para la fabricación de preregs.

La **Figura 34**, obtenida de ensayos previos a este trabajo, muestra el comportamiento de la viscosidad de la resina según la temperatura. Todos los

ensayos se han realizado a unas temperaturas comprendidas entre los 35 y 40 °C, por lo que la viscosidad apenas ha tenido impacto en la impregnación de las telas.

Como resultado final, por tanto, se obtienen las ecuaciones que permiten determinar la abertura de la bañera según el PCF que se quiera obtener, en unas condiciones de fabricación de $T = 35 - 40$ °C, $d = 0,9 - 1,3$ mm y $v = 1$ m/min:

Para mat225:

$$PCF (\%) = 20,32 \cdot e (mm)^{-1,368} \quad (2)$$

Para mat300:

$$PCF (\%) = 25,52 \cdot e (mm)^{-1,409} \quad (3)$$

Por lo que, si se quiere conseguir un PCF específico, solo habría que introducir el PCF deseado como variable y despejar e de la ecuación, valor que se utiliza como parámetro en la máquina de fabricación de preimpregnados.

8.2. Resultados de la Fase 2: Uso de moldes

Los moldes utilizados en este trabajo no están diseñados para ser utilizados en una prensa de membrana. Éstos son entregados sin ningún tipo de elementos que permitan proteger la membrana o la mesa. En la **Figura 35** pueden verse los moldes 1 y 2 respectivamente en su estado original, que son los que se usan en HLU.



Figura 35. Moldes utilizados en el proceso de HLU. Sin adaptar.

El proceso de adaptación de los moldes actual es un intento de minimizar los riesgos de rotura de membrana o mesa. Como todavía no se había analizado el comportamiento de la membrana o su adaptación, las carcasas de madera que se diseñaron no están optimizadas para el proceso de UVDF. En la **Figura 36** pueden verse los moldes con las carcasas de madera:



Figura 36. Moldes con la primera versión de la adaptación al proceso de UVDF.

Una vez analizado el comportamiento de la membrana al utilizar los moldes, se ha podido establecer un criterio de adaptación de moldes que permita una mejor adaptabilidad de la membrana. Aun así, es necesario realizar más pruebas aplicando las mejoras propuestas con el fin de identificar nuevas mejoras y seguir desarrollando la adaptación de los moldes.

Como se ha mencionado, es necesario modificar el proceso de adaptación para que pueda ser utilizado en la prensa de manera más eficiente. Para ello, se han establecido unos criterios de diseño a la hora de preparar los moldes:

- **El molde debe ser macizo:** Uno de los factores más importantes en este proceso es que el molde sea macizo. Si el molde no lo fuera, podrían generarse zonas en las que el vacío generaría tanta fuerza que sería capaz de romper la mesa debido a concentraciones de presión, como ya ha ocurrido en algunas ocasiones.
- **No puede tener aristas vivas:** Estos moldes son modificados de forma que se les proporciona una armadura de madera con el fin de hacerlo macizo. Esta coraza no puede tener aristas vivas, es decir, todas las esquinas deben estar redondeadas con radios superiores a 10 mm y la madera debe estar lijada para evitar astillas de manera que se evite la rotura de la membrana.
- **La madera debe estar al nivel del molde:** Para evitar tensiones no deseadas de la membrana e intentar conseguir la mejor adaptabilidad posible, es necesario que la madera de la coraza no se halle a un nivel superior al molde. De lo contrario, la membrana deberá adaptarse a más formas de las que tiene el molde en sí mismo, generando tensiones que dificultan la adaptabilidad e incluso pueden rasgar la membrana.
- **Debe haber espacio suficiente entre el límite de la pieza y el final del molde:** Los preimpregnados deben poder colocarse pasando en límite de pieza, por lo que debe existir un espacio suficiente para poder hacerlo. Esto permite también establecer zonas en las que es posible utilizar utillajes externos para evitar el deslizamiento de los preimpregnados, como se explicará más adelante.
- **Se deben eliminar todos los elementos que no tengan uso en el proceso de HDF:** Por ejemplo, el molde 1 incluye una goma alrededor de la parte superior del molde, esta no tiene ningún uso válido en el proceso de HDF, solo genera una forma más a la que la membrana debe adaptarse, por lo que es necesario eliminar este tipo de elementos.

Con estas modificaciones a la actual adaptación de los moldes en madera, se podrá alargar la vida útil de la membrana y mejorar la adaptabilidad de ésta, lo que dará lugar a mejores piezas, tanto estéticamente como con relación a sus características.

8.3. Resultados de la Fase 3: Compactación y curado

Los objetivos de esta fase son asegurar la adecuada adaptación de la membrana mediante el uso de utillajes externos para la fabricación de piezas de la misma calidad que en HLU y el desarrollo de un modelo de tiempos de curado.

8.3.1. Diseño del contramolde para compactación

Para asegurar una compactación de los prepregs contra el molde y conseguir una calidad de pieza mayor, se ha decidido hacer uso de utillajes. La membrana por si sola acarrea problemas de deslizamientos de los prepreg. La fricción entre los prepregs y la membrana es grande debido a la naturaleza pegajosa de los primeros, por lo que, al estirarse la membrana para adaptarse a la forma del molde, esta arrastra los prepregs consigo generando pliegues en la pieza final como los que se observan en la **Figura 37**.



Figura 37. Defecto de pliegues formados en los preimpregnados.

Por ello, se ha visto necesario crear un elemento que asegure la compactación y evite que el prepreg se deslice. Basando la idea en procesos como el RTM explicado anteriormente, se decidió fabricar un contramolde el cual fuera presionado de forma homogénea por la membrana. La característica principal de este elemento es que debe ser translúcido, ya que, al ir colocado sobre prepregs de curado ultravioleta, no puede bloquear el paso la luz. La solución a este problema, teniendo en cuenta costes y tiempo, fue la fabricación de un

contramolde de fibra de vidrio y resina de poliéster, el cual se ha visto que transmite la luz en un 44%.

Este utillaje debe tener una dimensión inferior al molde original, dependiendo del espesor que se quiera tener en la pieza. Como ésta era una idea conceptual, se ha querido probar su viabilidad antes de entrar con la precisión dimensional. El primer proceso ideado para la fabricación del contramolde fue fabricarlo sobre el número de capas de prepreg que la pieza a fabricar fuera a tener. Es decir, se colocaban los prepregs en el molde y sobre ellos un film de plástico negro para evitar su curado. Sobre ellos se colocaban dos capas de prepreg mat300 con 30% de resina y se compactaba con una bolsa de vacío. Al curar, se obtenía un contramolde con unas dimensiones inferiores a la pieza original. Sin embargo, la superficie sobre la que se fabricaba este contramolde, al ser prepregs sin curar, generaba irregularidades en el contramolde, las cuales después de hacer pruebas de fabricación de piezas generaba defectos, los cuales pueden apreciarse en la **Figura 38**.



Figura 38. El defecto A de la pieza final está formado por la imperfección B del contramolde utilizado para fabricarla.

Esto hizo necesaria la fabricación del contramolde contra una superficie lisa y homogénea. Para conseguir esta superficie, se fabricó una pieza mediante bolsa de vacío con una capa menos de preimpregnado y a posteriori, se le aplicó cemento a pistola en el interior y se lijó para que quedase totalmente liso. Después, para evitar impregnaciones, se le aplicó una capa de pintura y barniz, dando como resultado la superficie lisa sobre la que fabricar el contramolde de la **Figura 39**.



Figura 39. Base lisa a partir de una pieza para la fabricación del contramolde.

Fabricando el contramolde sobre esta superficie en vez de los preimpregnados sin curar se obtuvo un resultado menos rugoso como se puede ver en la comparación de los bordes en la **Figura 40**:



Figura 40. Arriba la versión 1 del contramolde fabricado sobre prepregs sin curar y abajo la segunda versión del contramolde fabricado sobre superficie lisa.

Sin embargo, esta mejoría no fue suficiente y se pensó en una segunda alternativa diferente.

8.3.2. Uso de membranas y segunda alternativa

Con el fin de conseguir la misma calidad de pieza que en HLU, se decidió probar una membrana de 0,3 mm de espesor. Tras unas pruebas de compactación sin

uso de preimpregnados y vista la buena adaptación, se decidió intentar fabricar una pieza sin el uso de un contramolde.

Sin el uso de algún utillaje externo que impidiera el desplazamiento de los prepregs, se generaron los defectos observables en la **Figura 37**, por lo que fue necesaria la fabricación de otro utillaje. En este caso, como la adaptabilidad de la membrana de 0,3 mm es notoriamente superior que la de una membrana de mayor espesor, se diseñaron unos anclajes de composite, los cuales pueden verse en la **Figura 41**, pensando en evitar el deslizamiento de los prepregs:



Figura 41. Diseño de los anclajes de los prepregs y evitar así su desplazamiento. Fabricados con las mismas características que el contramolde de la pieza completa.

Este sistema permitió fabricar piezas con una calidad superficial igual a la del proceso de HLU, por lo que se ha decidido mantener este proceso para fabricar las piezas finales de material compuesto.

8.3.3. Modelo de tiempos de curado

Para poder optimizar los tiempos de ciclo, se ha desarrollado un modelo para predecir los tiempos de curado de las piezas según su geometría y distancia al foco de emisión de luz UV.

Antes de comenzar a construir el modelo, es necesario identificar los parámetros relevantes en el cálculo del tiempo de curado mediante el proceso actual. Es conocido que un sustrato que se quiera curar necesitará de una irradiación total para curarlo del todo, es decir, deberá estar expuesto a una irradiancia durante un tiempo determinado. Con esto, es necesario medir la irradiancia de la lámpara

utilizada en el proceso, es decir, caracterizarla, y medir cuánto tiempo tarda en curar el sustrato midiendo el tiempo de curado mediante el dispositivo DEA.

8.3.3.1. Medición de la irradiancia

Para la construcción del modelo se ha hecho uso de la lámpara descrita en el apartado 7.2.4 y está formada por dos lámparas LEDLINE500 de dimensiones 15x500 mm en fila. Este modelo no cuenta con ninguna óptica que enfoque la luz hacia un punto determinado y emite una irradiancia de 300 mW/cm² a 2 cm de distancia según el fabricante. La medida de la irradiancia que emite la lámpara se ha realizado con un UV-Meter del mismo fabricante que la lámpara UV.

La caracterización de la lámpara se consiguió realizando mediciones con el UV-Meter. Para ello, se realizaron mediciones cada centímetro, de 2 a 30 cm, en el eje vertical justo debajo del centro de la emisión de la lámpara. La difusión horizontal se obtuvo realizando mediciones laterales en perpendicular a longitud de la lámpara cada 2 cm en cada una de las distancias correspondientes hasta que el sensor indicara un valor de 0 mW/cm².

8.3.3.2. Medición del tiempo de curado

El tiempo de curado total del sustrato se ha medido mediante el uso del ya mencionado dispositivo DEA del fabricante NETZSCH. Éste mide la viscosidad iónica de la muestra, la cual sufrirá un cambio durante el proceso de curado hasta estabilizarse completamente una vez completado. Se realizaron 3 mediciones en las que se obtuvo el tiempo total para llegar al grado de curado 100%.

8.3.3.3. Proceso experimental de compactación y curado

Tal y como ya se ha mencionado previamente, el proceso de compactación se basa en el uso de una prensa de membrana la cual se encarga de la compactación de los preimpregnados al molde con la ayuda de utillajes de fibra de vidrio y haciendo uso de una bomba de vacío. Una vez realizada la compactación se lleva a cabo el proceso de curado mediante la lámpara UVLED, realizándose barridos laterales que abarcan el ancho completo de la pieza. Gracias al fotoiniciador, el composite es curado al irradiar luz UV sobre él.

8.3.3.4. Determinación de la mitigación de luz de los utillajes

La mitigación de la irradiancia provocada por el uso de elementos como la membrana o el contramolde se mide comparando la emisión directa de la lámpara al UV-Meter con la emisión colocando los elementos mitigadores entre la lámpara y el medidor.

8.3.3.5. Aproximación teórica

Se ha desarrollado un modelo que predice el tiempo de curado de una pieza según su distancia al foco de luz UV. Las condiciones para el desarrollo del modelo se definen en el esquema de la **Figura 42**. La lámpara se coloca sobre una pieza de longitud L a una distancia d y se procede a realizar barridos a una velocidad v constante. La lámpara tiene la misma anchura que la de la pieza, por lo que no afecta al tiempo de curado.

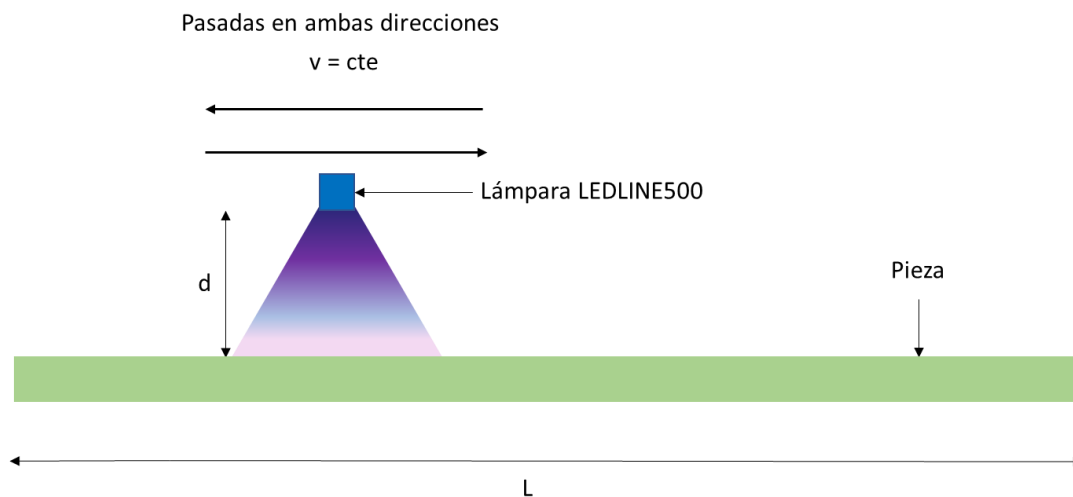


Figura 42. Esquema del proceso de curado.

Suponiendo un sustrato conocido y una fuente de radiación ultravioleta estática, ese sustrato tardará en curar un tiempo t_e (s), durante el cual se está irradiando una intensidad I_e (mW/cm²), es decir, el sustrato necesita una energía H_e (mWs/cm²) para curar, definida mediante la ecuación 4:

$$H_e = I_e \cdot t_e \quad (4)$$

Si la fuente de radiación UV tiene un movimiento longitudinal a velocidad constante y teniendo en cuenta que la difusión de la irradiancia en la ventana de radiación no es constante, la intensidad que le llega a una longitud L_L específica desplazando longitudinalmente la fuente UV se puede determinar por la ecuación de la curva de difusión de la intensidad longitudinal de la fuente UV. El área bajo de la curva presentada en la **Figura 43** representa la irradiancia por centímetro (mW/cm) que emite la lámpara y se puede calcular mediante la ecuación 5 y cuyos límites están establecidos de 0 a L_L por el uso de la simetría:

$$I_d = 2 \cdot \int_0^{L_L} I(L_L) dL_L \quad (5)$$

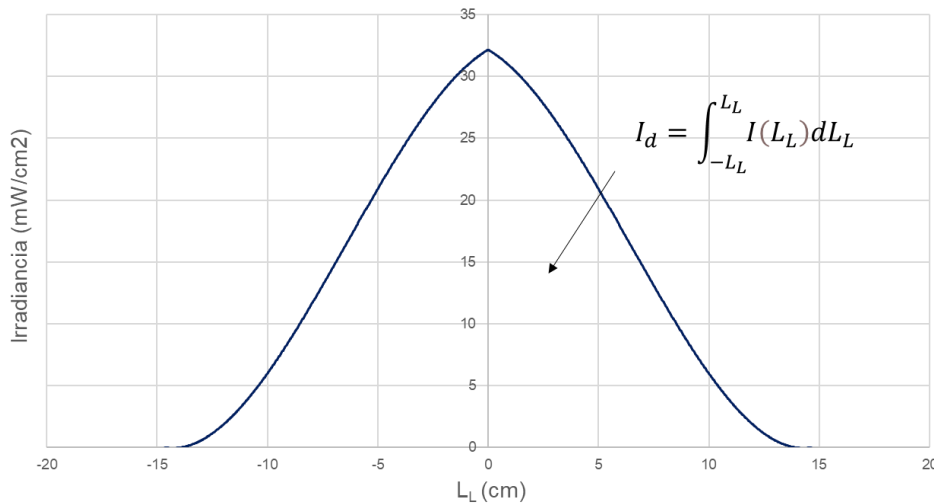


Figura 43. Curva de irradiancia en función de la distancia horizontal LL para una distancia d cualquiera.

Si se conoce la energía necesaria para curar el sustrato de la pieza de forma estática vista en la ecuación 4 y se conoce la energía necesaria para curar la anchura de la emisión de la lámpara (L_L) en dinámico, entonces la energía necesaria para curarla anchura L_L se determinará mediante la ecuación 6:

$$H_d = \frac{2 \cdot \int_0^{L_L} I(L_L) dL_L}{L_L} \cdot t_d \quad (6)$$

Entonces, igualando H_e igual a H_d , se obtiene la ecuación 7:

$$H_d = H_e \rightarrow \frac{2 \cdot \int_0^{L_L} I(L_L) dL_L}{L_L} \cdot t_d = I_e \cdot t_e \quad (7)$$

Y, por tanto, el tiempo total de curado dinámico para la anchura de la emisión de la lámpara sería:

$$t_d = \frac{I_e \cdot t_e}{\frac{2 \cdot \int_0^{L_L} I(L_L) dL_L}{L_L}} \quad (8)$$

El tiempo total de curado para cualquier longitud de molde L a una velocidad constante se calcularía multiplicando el número de veces que existe la anchura de emisión (L_L) en la longitud del molde (L):

$$t_t = t_d \cdot \frac{L}{L_L} = \frac{I_e \cdot t_e}{\frac{2 \cdot \int_0^{L_L} I(L_L) dL_L}{L_L}} \cdot \frac{L}{L_L} \quad (9)$$

Finalmente, simplificando la ecuación anterior y añadiendo el impacto que tienen los elementos mitigadores, los cuales modifican la cantidad de energía puesto que afectan de manera directa al área bajo la curva y se escribe con símbolo T_m , se obtiene:

$$t_t = \frac{I_e \cdot t_e}{T_m \cdot \text{Área bajo la curva}} \cdot L = \frac{H_e \cdot L}{T_m \cdot 2 \cdot \int_0^{L_L} I(L_L) dL_L} \quad (10)$$

Por tanto, para conocer el t_t , tiempo total de curado, se necesita conocer I_e , intensidad en estático y t_e , tiempo de exposición a esa irradiancia, y el área bajo la curva de difusión horizontal de la irradiancia de la fuente UV.

8.3.3.6. Obtención de H_e mediante I_e y t_e

La cantidad de energía total por unidad de área necesaria para curar por completo un sustrato se obtiene multiplicando el valor de la irradiancia I_e , obtenido mediante la ecuación 11 y es función de d , por el tiempo de curado t_e obtenido mediante el DEA.

Realizando ensayos a diversas distancias se determinó la cantidad de energía total de curado H_e para un sustrato formado por 3 capas de mat 300 con un 30% de PCF.

Tabla 5. Energía necesaria para el curado total de una pieza con 3 capas de mat300 con 30% de PCF.

Medición	Irradiancia (mW/cm ²)	Tiempo de exposición (s)	H _e (mWs/cm ²)
1	97	210	20370
2	57	360	20520
3	37	570	21090

Con el fin de obtener un dato único para el cálculo del tiempo de curado total se ha hecho uso del promedio de las 3 mediciones: 20660 mWs/cm². El error de las medidas respecto al promedio se sitúa en torno a un ± 2%, error que se considera asumible.

8.3.3.7. Obtención del área bajo la curva

Para obtener el mapa de gradiente de la lámpara mediante el cual será posible obtener las curvas de difusión horizontal $I(L_L)$, se han realizado mediciones mediante el UV-Meter cada centímetro en vertical y cada 2 cm en horizontal, tal y como se ha descrito en el apartado 8.3.3.1. Los resultados de las mediciones pueden observarse en la **Figura 44**.

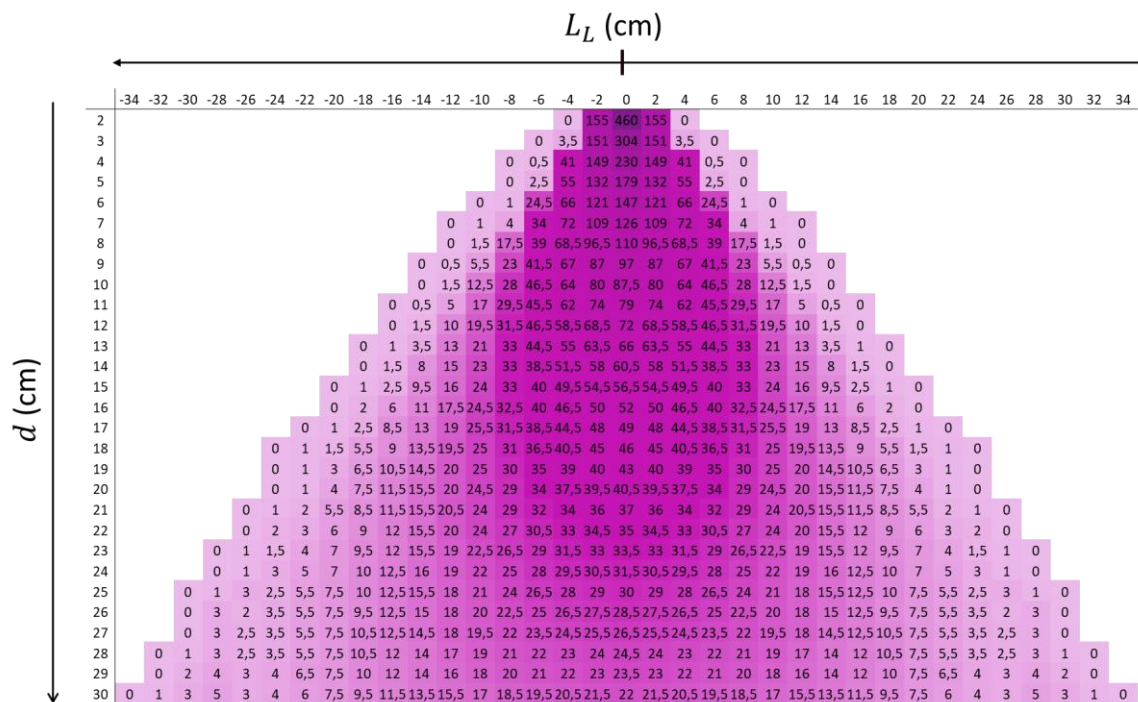


Figura 44. Mapa de gradiente de la lámpara UV LEDLINE500 de HÖNLE

Visto el mapa de gradiente, es posible modelizar la emisión en el punto central realizando una regresión potencial de manera que se determina la ecuación 11, la cual relaciona la irradiancia con la distancia de emisión.

$$I(d) = 1083d^{-1,11} \quad (11)$$

El objetivo del modelo es poder otorgar una distancia cualquiera y que éste calcule la ecuación $I(L_L)$ correspondiente para después utilizarla en la ecuación 10 y obtener así el tiempo de curado total. Para ello, se ha obtenido la curva de difusión horizontal de todas y cada una de las distancias a partir de los puntos obtenidos en la **Figura 44**. Después, se han resuelto las ecuaciones para las irradiancias correspondientes al 75, 50, 25 y 0% de la emisión central o cuando $L_L = 0$, obteniendo los puntos correspondientes. De esta manera, es posible obtener la relación entre las curvas en los puntos de 75, 50, 25 y 0% de la irradiancia máxima, la cual estará definida por varias ecuaciones, y modelizar la emisión. La **Figura 45** muestra lo explicado.

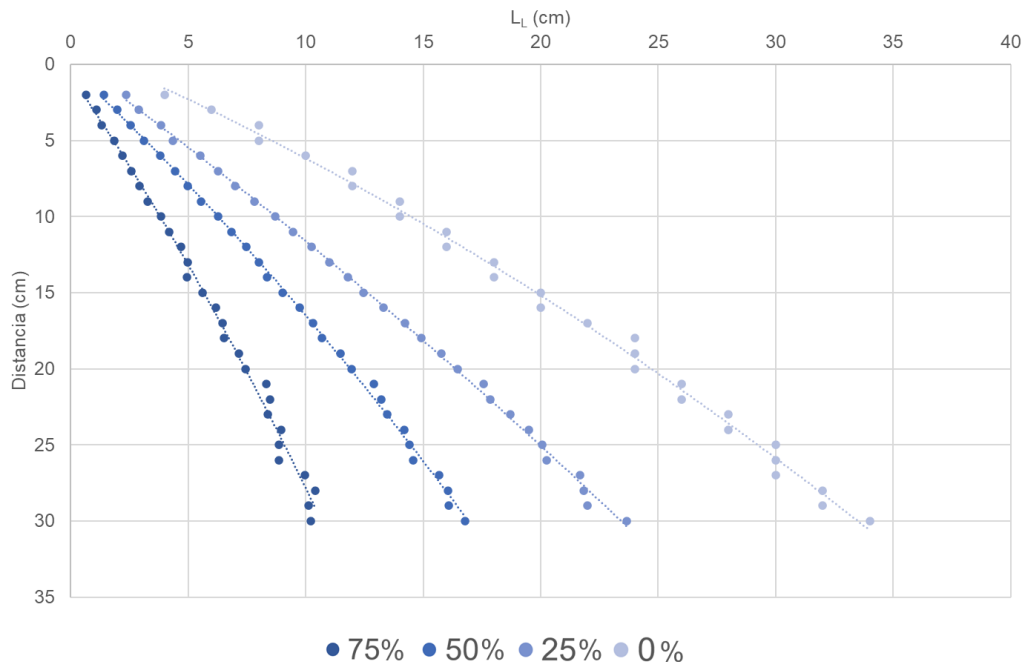


Figura 45. Obtención de las ecuaciones del 75, 50, 25 y 0% del valor máximo de la emisión.

Conociendo las ecuaciones que relacionan los puntos para las intensidades mencionadas, es posible obtener al menos 5 puntos, los cuales se presentan en

la **Tabla 6** y a partir de los que se podría construir la ecuación de la difusión horizontal $I(L_L)$ para cualquier distancia.

Tabla 6. Puntos necesarios para el cálculo de la ecuación de difusión horizontal de la lámpara.

Irradiancia (%)	Punto	Coordenada L_L (cm)	Coordenada I (mW/cm ²)
100	P1 (L_L, I)	0	$I(d)$
75	P2 (L_L, I)	$-0,0027 d^2 + 0,445 d - 0,3518$	$0,75 \cdot I(d)$
50	P3 (L_L, I)	$-0,0036 d^2 + 0,6718 d - 0,0904$	$0,5 \cdot I(d)$
25	P4 (L_L, I)	$-0,0036 d^2 + 0,8766 d + 0,3207$	$0,25 \cdot I(d)$
0	P5 (L_L, I)	$-0,0093 d^2 + 1,3135 d + 2,224$	0

Las ecuaciones que se utilizan para la obtención de la coordenada horizontal de la difusión de la lámpara son obtenidas a partir de una regresión polinomial de segundo grado, realizada a partir de los puntos de la **Figura 45**.

De esta manera, al proporcionar una distancia, se obtienen 5 puntos mediante los que realizar una regresión polinomial de tercer grado y obtener así la ecuación de difusión horizontal $I(L_L)$ para la distancia deseada, la cual se utilizará, como ya se ha mencionado, en la ecuación 10.

8.3.3.8. Cálculo del tiempo total de curado

Una vez obtenida la difusión horizontal de la lámpara a cualquier distancia y la cantidad de energía necesaria para curar el sustrato especificado, es posible calcular el tiempo de curado total añadiendo la longitud de la pieza L . En el caso de este cálculo, se ha considerado un molde de 100 cm y una $T_m = 1$, ya que no se han considerado elementos mitigadores.

De la caracterización y posterior simplificación de la emisión de la lámpara es posible obtener una ecuación cuya integral definida representará la irradiancia por unidad de longitud emitida. Conociendo entonces la ecuación de difusión horizontal, la cantidad de energía necesaria (obtenida de la multiplicación de los parámetros I_e y t_e) para curar un sustrato determinado y la longitud de la pieza a curar es posible obtener el tiempo total de curado utilizando la ecuación 10.

$$t_t = \frac{20660 \left(\frac{mWs}{cm^2}\right)}{1 \cdot 2 \cdot \int_0^{L_L} I(L_L) dL_L \left(\frac{mW}{cm}\right)} \cdot 100 (cm) \quad (12)$$

Haciendo una comparativa entre el modelo de la curva de la emisión simplificada y el modelo obtenido a partir de las curvas obtenidas experimentalmente (la correspondiente a cada distancia) a partir de la lámpara descrita en el apartado 8.3.3.7, se obtiene la **Figura 46**, obtenida utilizando la ecuación 12:

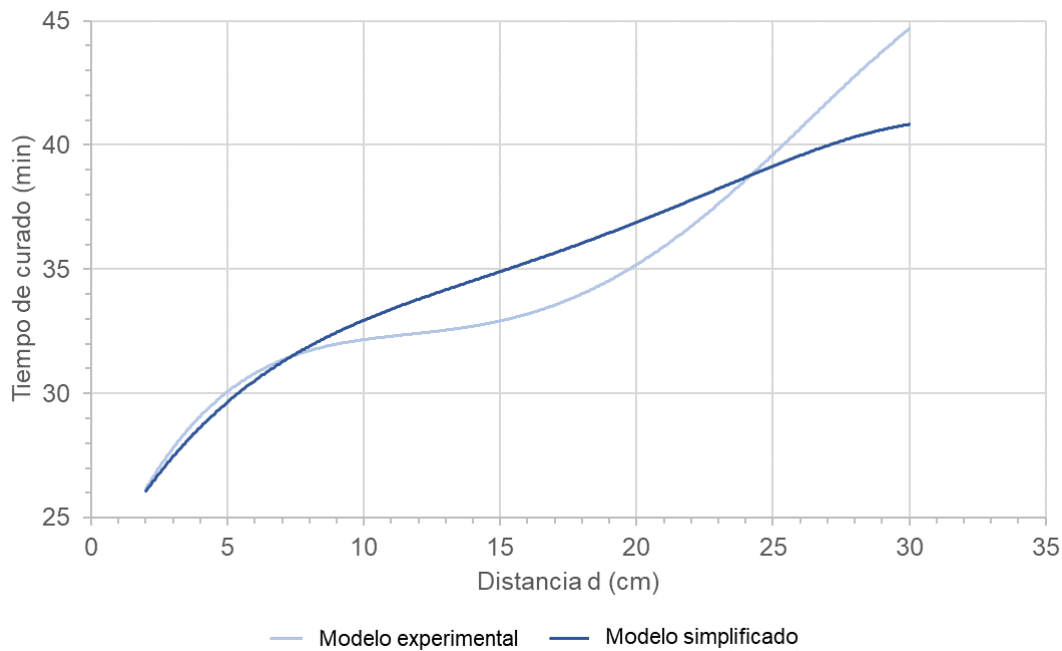


Figura 46. Comparativa entre los tiempos de curado totales usando el modelo de emisión simplificada y el modelo experimental.

8.3.3.9. Demostración del cálculo del tiempo total de curado

Con el fin de demostrar la validez de los modelos desarrollados, se ha realizado un ensayo en el que se ha curado una pieza de 100 cm de longitud y sin elementos mitigadores, por lo que $T_m = 1$. La realización de este ensayo se ha basado en la realización de pasadas de 100 cm sobre una muestra colocada en el DEA, de manera que se ha monitorizado su curado (**Figura 47**). Los puntos obtenidos para formar la curva mediante una regresión polinómica de grado 4 han sido los correspondientes a las distancias 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 cm.

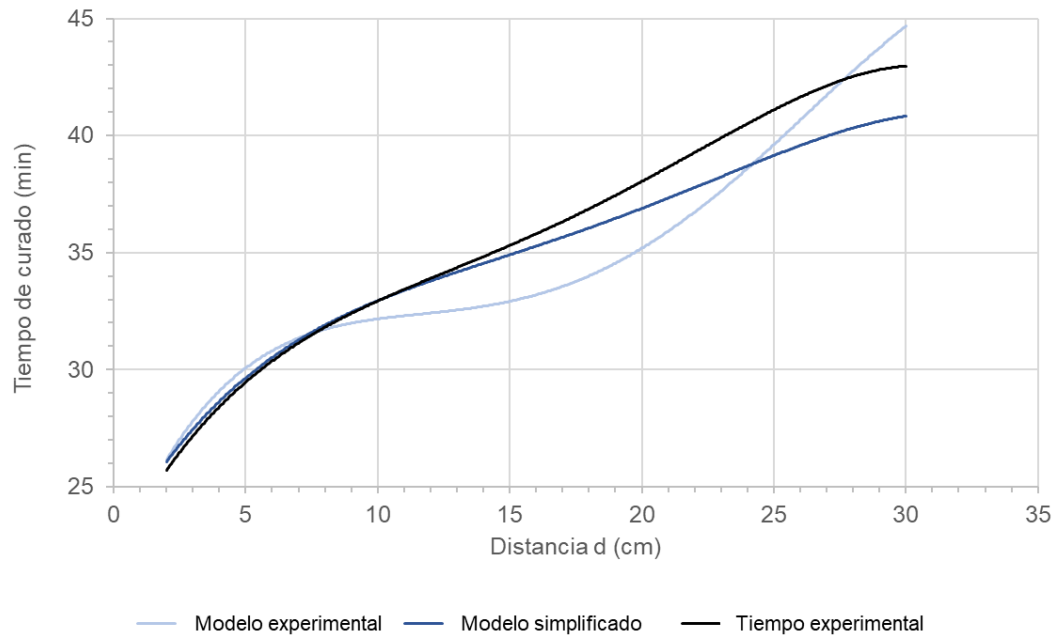


Figura 47. Comparativa entre las curvas del modelo de emisión simplificada, el modelo experimental y datos de tiempo de curado experimentales, éstos últimos ilustrados en negro.

Como se puede observar, el comportamiento de las curvas del modelo de emisión simplificada y datos de tiempos experimentales es similar. Existe un error promedio entre el modelo de emisión simplificada respecto a la curva obtenida a partir de mediciones del tiempo de curado experimentales del $\pm 1,8\%$, pero es un error que se considera asumible. Este error se genera por la diferencia que existe en los límites de la emisión. La irradiancia real se da ligeramente más allá de los límites horizontales establecidos para las ecuaciones, solo que el medidor UV no indica esa luz residual. Sin embargo, a mayor distancia, los efectos de esta luz residual son más notorios, dándose la diferencia que se puede ver en la **Figura 47**. Se ha decidido hacer uso del modelo de emisión simplificada como modelo adecuado.

Los datos a partir de los que se han obtenido estas curvas pueden verse en el Anexo I.

8.4. Resultados de la Fase 4: Obtención de la pieza final

Uno de los objetivos de esta fase es la comprobación de la homogeneidad en los espesores de las piezas fabricadas. Para ello, se han fabricado varias piezas a partir del molde 1. Se han medido los espesores en cada pieza, los cuales

deberían mantenerse relativamente constantes a lo largo de la pieza. Las mediciones se han realizado de manera aleatoria en diferentes secciones de misma y los resultados se muestran en la **Tabla 7**:

Tabla 7. Resultados de las mediciones de las piezas del molde 1. "P" significa "pieza" y la nomenclatura "1-1" hace referencia a "molde-pieza". Los datos representan una medida principal junto a su desviación estándar.

Pieza	Espesor (mm)
P 1-1	2,52 ± 0,44
P 1-2	2,55 ± 0,27
P 1-3	2,42 ± 0,32
P 1-4	3,01 ± 0,26
P 1-5	2,56 ± 0,31
P 1-6	3,04 ± 0,29
P 1-7	3,14 ± 0,33
P 1-8	3,06 ± 0,33
P 1-9	3,18 ± 0,28

De estos valores es posible hacerse una idea de la homogeneidad en los espesores de la pieza. Cuanto menor sea la desviación estándar de las 15 medidas realizadas en puntos aleatorios de la pieza, más homogénea será esta. Se han establecido como valores aceptables de desviación estándar todos aquellos valores que se sitúen por debajo de 0,5 mm, lo que supondría una diferencia máxima de 1 mm entre el punto más grueso y el más fino. Estos resultados se consideran aceptables para el estado de desarrollo en el que se encuentra el proceso.

En cuanto a la calidad superficial de la pieza, a medida que se han ido fabricando mejores preimpregnados, un mejor contramolde y finalmente una membrana más fina con un sistema de utillaje más simple, esta calidad superficial ha ido mejorando. A continuación, la **Figura 48** muestra cada una de las 9 piezas y una breve descripción de la variación en el proceso:



Figura 48. Las 9 piezas fabricadas con el objetivo de mejorar la calidad visual de la pieza. Ordenadas por orden cronológico.

Las piezas muestran una mejoría notoria cuando se les aplican 2 capas de gelcoat. Las variaciones en el PCF o el gramaje de fibra total parecen no contribuir a una mejoría de la calidad superficial de la pieza con el método de fabricación del contramolde, por lo que se podría decir que la compactación no es buena. En la **Tabla 8** se muestran las diferencias entre las piezas.

Tabla 8. Resultados de la caracterización de las 9 piezas fabricadas según el método de fabricación.

Pieza	PCF (%)	Gramaje de fibra g/m2	Uillaje	Capas
P 1-1	n/s	750	Contramolde V1	2 mat225 y 1 mat300
P 1-2	n/s	675	Contramolde V1	3 mat225
P 1-3	n/s	825	Contramolde V1	2 mat300 y 1 mat225
P 1-4	30	825	Contramolde V1	2 mat300 y 1 mat225
P 1-5	30	675	Contramolde V1	3 mat225
P 1-6	37	900	Contramolde V1	3 mat300
P 1-7	27	825	Contramolde V2	2 mat300 y 1 mat225
P 1-8	27	825	Membrana fina y frenos	2 mat300 y 1 mat225
P 1-9	25	675	Membrana fina y frenos	3 mat225

Tras observar que al hacer uso de una membrana de 0,3 mm de espesor y el uso de anclajes como utillaje se obtienen resultados satisfactorios, se ha decidido mantener este proceso como proceso válido de fabricación de piezas en UVDF.



9. Memoria económica

Para el cálculo de los costes de fabricación de las piezas de composite de curado UV con el fin de hacer una comparación con el proceso de laminación manual, se han tenido en cuenta 3 aspectos; los prepregs, la colocación y compactación de estos y los costes de amortización de la máquina de fabricación de prepregs.

Si los costes de fabricación de prepregs, que corresponden a 5,52 €/m², los costes de materiales como el gelcoat, los costes de amortización de máquina y el coste de colocación y compactación de los prepregs (corte, colocación, curado...) son conocidos, es posible hacer una comparación del coste unitario. Para una pieza con las mismas características que los datos proporcionados por una empresa del sector, los costes asociados a la fabricación serían de 58,13 €, los costes asociados a la compactación serían 38,49 € y otros materiales como el gelcoat que añadirían un coste por pieza de 2,25 €, se puede obtener el coste unitario de 98,88 €/pieza, y compararlo con los 110 € del proceso de laminación manual. En este cálculo, no se ha tenido en cuenta la adaptación de los moldes, las pérdidas por paradas de máquina o el desperdicio de materiales. A su vez, se han tenido en cuenta costes de la materia prima elevados y tasas horarias correspondientes a una persona altamente cualificada, lo que eleva los costes.

De esta manera, se obtiene que las piezas fabricadas con el proceso de UVDF y las mismas características pueden ser un **10,11% más baratas**, lo que, incluyendo los datos de amortización de máquina y suponiendo un volumen de piezas de 200 piezas al año, se obtiene un beneficio anual de 2224,56 €, los cuales pueden elevarse si se industrializara el proceso, de manera que los costes de la materia prima y las tasas horarias disminuyeran.

10. Conclusiones

Tal y como se ha descrito en este trabajo, se han desarrollado diferentes fases con diferentes fines y tareas cuyo objetivo común ha sido la mejora y optimización de un proceso de fabricación de piezas de composite (poliéster + fibra de vidrio) para el sector de la movilidad, haciendo hincapié en los tiempos de ciclo y la calidad de las piezas fabricadas mediante el proceso UVDF. De hecho, el punto fuerte del proceso de UVDF son los tiempos de ciclo. Gracias a la capacidad de fabricar prepregs de forma automática y conocer el tiempo de curado gracias al modelo creado, es posible establecer un tiempo de ciclo, en este caso para una pieza de 100 cm (**Tabla 9**).

Tabla 9. Resumen de tiempos de ciclo.

Proceso	Tiempo
Fabricación del prepregs	10 min
Colocación de prepregs	60 min
Preparación de la formadora	15 min
Compactación y curado	40 min
Obtención de la pieza	5 min
Tiempo total	2 h 15 min

Comparando los procesos de HLU y UVDF, se puede decir que el proceso de UVDF es superior en cuanto a cadencia de piezas por la velocidad de curado que proporciona la resina de curado UV, pasando de alrededor de 48 h a en torno a 2h. Esto permite además una reducción en el uso del número de moldes de una misma pieza, puesto que para aumentar la cadencia de las piezas en el proceso de HLU, se hace uso de varios moldes.

Otra de las inquietudes de los fabricantes de piezas es que no se tiene un control en los espesores ni en el porcentaje en fibra de las piezas fabricadas. El proceso de UVDF ha demostrado ser capaz de mantener unos espesores estables y mediante la modelización de los parámetros de máquina, es posible obtener un PCF determinado.

Finalmente, en el aspecto económico, se conoce que fabricar una pieza con las mismas características que la proporcionada por la empresa perteneciente al

sector de la movilidad tiene un coste aproximado de 110 €. Con el proceso del UVDF este coste se reduce un 10,11 %, como se ha mencionado anteriormente, colocándose en 98,88 €.

Por lo que, siendo un proceso con una mayor cadencia y un coste reducido, se convierte en una alternativa muy llamativa para el sector del transporte, en especial para el electrificado.

11. Líneas futuras

A pesar de los avances conseguidos durante el transcurso de este trabajo, todavía quedan áreas que mejorar y cimentar.

El prototipo de fabricación de prepregs necesita más desarrollo. Por ahora se ha observado que es capaz de fabricar telas mat 225 y mat 300 con buena repetitividad y un PCF controlado y modelizado. Sin embargo, para poder industrializarla, es necesario que sea capaz de impregnar más tipos de tela, como biaxiales o uniaxiales. Por ello, es necesario realizar ensayos con los tipos de tela mencionados y determinar los cambios necesarios en el diseño de la máquina.

El diseño de la adaptación de los moldes para el proceso de UVDF juega un papel importante en la eficiencia de la adaptación de la membrana. Los criterios de diseño propuestos en este trabajo deben ser puestos a prueba con el fin de identificar nuevos problemas y generar así mejora continua.

En cuanto a la compactación de las piezas en la prensa de membrana, además de poner a prueba los criterios de adaptación de moldes al proceso, es necesario hacer uso de membranas de diferentes grosores para determinar de forma definitiva cuál es la mejor forma de compactar.

El modelo de tiempos de curado creado en este trabajo está desarrollado para pieza plana. Por lo que, para optimizar los tiempos de curado, si se tiene un molde con diferentes geometrías, habría que clasificar esas secciones y realizar curados independientes, cuyo sumatorio resultaría en el tiempo total de curado. Para lados inclinados, se ha podido observar que éstos curan antes que las caras más alejadas. El hecho de realizar varios barridos independientes en diferentes

secciones del molde debe ser comparado con el tiempo total de curado de la realización de una única serie de barridos a una distancia determinada abarcando todo el molde, con el fin de determinar si la estrategia es favorable.

A pesar de que se ha conseguido fabricar la pieza del molde 1 con éxito, es necesario probar el proceso con otros tipos de pieza con sus moldes correspondientes, de manera que sea posible establecer unos criterios de fabricación de utillajes para compactación partiendo del diseño inicial de los anclajes y descartando definitivamente el contramolde.

Otro de los aspectos que quedan por investigar es la durabilidad de los componentes que forman parte de proceso; el desgaste del teflón del rodillo, de moldes, de la bomba de la prensa de membrana, de la membrana en sí misma, etc. Es necesario conocer cuántas piezas es posible fabricar antes de tener que sustituir un elemento del proceso, el cual aumentará el coste unitario de las piezas.

12. Bibliografía

- [1] Precedence Research, «Advanced Composites Market (By Product: Aramid Fiber Composites Carbon Fiber Composites, S-Glass Fiber Composites, Others; By Application Type: Aerospace & defense, Automotive, Transportation, Electrical & Electronics, Wind energy, Civil Engineering, Medical, Marine, Sporting goods, Others; By Resin: Advanced Thermosetting Composites, Advanced Thermoplastic Composites; By Manufacturing Process) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2022-2030», 2021.
- [2] V. J. Lopata, C. B. Saunders, A. Singh, C. J. Janke, G. E. Wrenn, y S. J. Havens, «Electron-beam-curable epoxy resins for the manufacture of high-performance composites», *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 56, n.º 4, pp. 405-415, oct. 1999, doi: 10.1016/S0969-806X(99)00330-8.
- [3] N. Krämer, U. Lohbauer, D. Eng, F. García-Godoy, y R. Frankenberger, «Light curing of resin-based composites in the LED era», *Am J Dent*, vol. 21, 2008.
- [4] K. Maag, W. Lenhard, y H. Löffles, «New UV curing systems for automotive applications», *Prog Org Coat*, vol. 40, n.º 1-4, pp. 93-97, dic. 2000, doi: 10.1016/S0300-9440(00)00144-2.
- [5] Huntsman, «Driving weight savings in underbody battery protection», *JEC Composites*, 2022.
- [6] C. Decker, «The use of UV irradiation in polymerization», *Polym Int*, vol. 45, n.º 2, pp. 133-141, feb. 1998, doi: 10.1002/(SICI)1097-0126(199802)45:2<133::AID-PI969>3.0.CO;2-F.
- [7] R. Golden, «Sustainability Advantages of Ultraviolet and Electron Beam Curing», jul. 2008.
- [8] P. Compston, J. Schiemer, y A. Cvetanovska, «Mechanical properties and styrene emission levels of a UV-cured glass-fibre/vinylester composite»,



- Compos Struct*, vol. 86, n.º 1-3, pp. 22-26, nov. 2008, doi: 10.1016/j.compstruct.2008.03.012.
- [9] T. Kulhan, A. Kamboj, N. K. Gupta, y N. Somani, «Fabrication methods of glass fibre composites—a review», *Functional Composites and Structures*, vol. 4, n.º 2, p. 022001, jun. 2022, doi: 10.1088/2631-6331/ac6411.
- [10] M. Balasubramanian, *Composite Materials and Processing*. CRC Press, 2013. doi: 10.1201/b15551.
- [11] J. JyotiKalita y K. Kumar Singh, «Tribological Properties of Different Synthetic Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites- A review», *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 455, p. 012134, dic. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/455/1/012134.
- [12] Mundo Plast, «Exel Composites destaca el auge de los compuestos termoplásticos», 21 de diciembre de 2020. <https://mundoplast.com/compuestos-termoplasticos-exel-composites/> (accedido 2 de mayo de 2023).
- [13] Comisión Europea, «Un Pacto Verde Europeo», 2023. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es (accedido 2 de mayo de 2023).
- [14] «Fabricación de grandes series de composites avanzados». <https://www.aimplas.es/blog/nuevos-metodos-de-produccion-haran-posible-fabricar-grandes-series-de-composites-avanzados/> (accedido 9 de mayo de 2023).
- [15] AddComposites, «Fiber Reinforcements», 16 de noviembre de 2021. <https://www.addcomposites.com/post/fiber-reinforcements> (accedido 2 de mayo de 2023).
- [16] Y. Yang, R. Boom, B. Irion, D.-J. van Heerden, P. Kuiper, y H. de Wit, «Recycling of composite materials», *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 51, pp. 53-68, ene. 2012, doi: 10.1016/j.cep.2011.09.007.



- [17] R. Stewart, «Thermoplastic composites — recyclable and fast to process», *Reinforced Plastics*, vol. 55, n.º 3, pp. 22-28, may 2011, doi: 10.1016/S0034-3617(11)70073-X.
- [18] E. Osoka, O. Dominic Onukwuli, y C. Kamalu, «Mechanical Properties Of Selected Natural Fiber Reinforced Composites For Automobile Application 1* ADSORPTION THERMODYNAMICS View project Modeling viscosity behavior of crude oil View project», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/328278767>
- [19] Composites World, «Composite vs. corrosion: Battling for marketshare | CompositesWorld», 2011. <https://www.compositesworld.com/articles/composite-vs-corrosion-battling-for-marketshare> (accedido 2 de mayo de 2023).
- [20] R. Abdallah *et al.*, «A Critical Review on Recycling Composite Waste Using Pyrolysis for Sustainable Development», *Energies (Basel)*, vol. 14, n.º 18, p. 5748, sep. 2021, doi: 10.3390/en14185748.
- [21] GWEC, «GWEC envisages 5.8TW of wind by 2050 - Global Wind Energy Council». <https://gwec.net/gwec-envisages-5-8tw-of-wind-by-2050/> (accedido 2 de mayo de 2023).
- [22] A. Shojaei, S. R. Ghaffarian, y S. M. H. Karimian, «Modeling and simulation approaches in the resin transfer molding process: A review», *Polym Compos*, vol. 24, n.º 4, pp. 525-544, ago. 2003, doi: 10.1002/pc.10050.
- [23] K. Abdurrohman y M. Siahaan, «Effect of mesh-peel ply variation on mechanical properties of E-glas composite by infusion vacuum method», *J Phys Conf Ser*, vol. 1005, p. 012009, abr. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1005/1/012009.
- [24] C. D. Han, D. S. Lee, y H. B. Chin, «Development of a mathematical model for the pultrusion process», *Polym Eng Sci*, vol. 26, n.º 6, pp. 393-404, mar. 1986, doi: 10.1002/pen.760260604.



- [25] B. Middleton, «Composites: Manufacture and Application», en *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality*, Elsevier, 2016, pp. 53-101. doi: 10.1016/B978-0-323-34061-8.00003-X.
- [26] I. Sáenz Domínguez, «Pultrusión basada en el curado UV fuera del molde: desarrollo de componentes dirigidos a la industria de la automoción», Research, Escuela Politécnica de Mondragón, Mondragón, 2019.
- [27] Y. Di Boon, S. C. Joshi, y S. K. Bhudolia, «Review: Filament Winding and Automated Fiber Placement with In Situ Consolidation for Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer Composites», *Polymers (Basel)*, vol. 13, n.º 12, p. 1951, jun. 2021, doi: 10.3390/polym13121951.
- [28] C. H. Park y W. I. Lee, «Compression molding in polymer matrix composites», en *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Elsevier, 2012, pp. 47-94. doi: 10.1533/9780857096258.1.47.
- [29] P. S. G. Krishnan y S. T. Kulkarni, «Polyester resins», *Polyesters and Polyamides*, pp. 3-40, 2008, doi: 10.1533/9781845694609.1.3.
- [30] G. Aklilu, S. Adali, y G. Bright, «Temperature Effect on Mechanical Properties of Carbon, Glass and Hybrid Polymer Composite Specimens», *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 39, pp. 119-138, nov. 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/JERA.39.119.
- [31] V. J. Lopata, C. B. Saunders, A. Singh, C. J. Janke, G. E. Wrenn, y S. J. Havens, «Electron-beam-curable epoxy resins for the manufacture of high-performance composites», *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 56, n.º 4, pp. 405-415, oct. 1999, doi: 10.1016/S0969-806X(99)00330-8.
- [32] M. S. Johnson, A. Long, A. Endruweit, M. Johnson, y A. Long, «Curing of composite components by ultraviolet radiation: A review Article in Polymer Composites - Large deformation modelling of woven fabric and its effect on permeability View project Stochastic Simulation of Composites Manufacturing View project Curing of Composite Components by Ultraviolet Radiation: A Review», 2006, doi: 10.1002/pc.20166.

- [33] H. Zhou *et al.*, «Hydrogen abstraction of carbon/phosphorus-containing radicals in photoassisted polymerization», *RSC Adv*, vol. 6, n.º 73, pp. 68952-68959, 2016, doi: 10.1039/C6RA00156D.
- [34] K. Ruhland, F. Habibollahi, y R. Horny, «Quantification and elucidation of the UV-light triggered initiation kinetics of TPO and BAPO in liquid acrylate monomer», *J Appl Polym Sci*, vol. 137, n.º 6, p. 48357, feb. 2020, doi: 10.1002/app.48357.
- [35] H. L. Lee, «The Handbook of Dielectric Analysis and Cure Monitoring», 2017. [En línea]. Disponible en: www.lambient.com

Anexo I: Modelo de tiempos de curado

El modelo matemático presentado en el trabajo se obtiene mediante la regresión polinómica de los puntos representados en la siguiente tabla. El cálculo del tiempo se obtiene mediante la ecuación 10 para los parámetros descritos en el apartado 8.3.3. La tabla muestra el valor de la integral de la ecuación de difusión horizontal, el tiempo calculado y el error entre cada una de las curvas. EXP hace referencia al modelo experimental, SIMP al modelo simplificado y REAL a los tiempos de curado obtenidos experimentalmente.

INTEGRAL		TIEMPO			Error		
EXP	SIMP	EXP	SIMP	REAL	EXP/SIMP	EXP/REAL	SIMP/REAL
1440	1367,29	23,9	25,18	25,5	5,0%	6,2%	1,2%
1151	1227,80	29,9	28,04		6,7%		
1171	1179,55	29,4	29,19		0,7%		
1090	1149,21	31,6	29,96	30	5,4%	5,3%	0,1%
1122	1125,12	30,7	30,60		0,3%		
1109	1104,27	31,1	31,18		0,4%		
1103	1085,55	31,2	31,71		1,6%		
1081	1068,38	31,8	32,22		1,2%		
1103	1052,45	31,2	32,71	32,25	4,6%	3,2%	1,4%
1085	1037,52	31,7	33,18		4,4%		
1086	1023,43	31,7	33,64		5,7%		
1065	1010,06	32,3	34,09		5,2%		
1034	997,31	33,3	34,52		3,5%		
1034	985,10	33,3	34,95	35,75	4,7%	6,8%	2,2%
1019	973,37	33,8	35,37		4,5%		
1030	962,05	33,4	35,79		6,6%		
999	951,12	34,5	36,20		4,8%		
976	940,51	35,3	36,61		3,7%		
978	930,22	35,2	37,01	38	4,9%	7,4%	2,6%
963	920,19	35,8	37,41		4,4%		
931	910,42	37,0	37,81		2,2%		
928	900,87	37,1	38,22		2,9%		
901	891,53	38,2	38,62		1,0%		
881	882,39	39,1	39,02	41	0,1%	4,7%	4,8%
839	873,42	41,0	39,42		4,1%		
841	864,61	41,0	39,82		2,8%		
794	856,0	43,4	40,2		7,8%		
784	847,43	43,9	40,63		8,1%		
771	839,05	44,7	41,03	43	8,8%	3,9%	4,6%

Las ecuaciones que corresponden a las tres curvas son las siguientes, obtenidas a partir de una regresión polinómica de cuarto grado:

Modelo experimental:

$$Y_e = -0,0001x^4 + 0,0111x^3 - 0,2693x^2 + 2,7845x + 21,579$$

Modelo simplificado:

$$Y_s = -7E-05x^4 + 0,0055x^3 - 0,1453x^2 + 2,0153x + 22,57$$

Tiempo experimental:

$$Y_t = -1E-04x^4 + 0,0069x^3 - 0,1668x^2 + 2,1744x + 21,963$$