

**ESTUDIO DE LA PERMEABILIDAD Y LA FABRICACIÓN DE MATERIALES
COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH POR RTM**

JOSE LUIS MEJIA MONTERO

Asesor: EDGAR ALEXANDER OSSA

MEDELLÍN

UNIVERSIDAD EAFIT

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

2013

Nota de Aceptación

Firma del Jurado

Firma del jurado

Medellín, _____ de _____ de 2013

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco primeramente a la Universidad Eafit por su apoyo logístico y económico en desarrollo de este estudio. A mi asesor Alexander Ossa por su orientación y paciencia durante todo el progreso del proyecto. A mi familia, novia y amigos por su apoyo.

Contenido

1	RESUMEN	9
2	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	10
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	10
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	10
3	INTRODUCCIÓN.....	11
4	FABRICACIÓN DE LAMINADOS TIPO SÁNDWICH POR RTM.....	15
4.1	MATERIALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH	15
4.2	MOLDEO POR TRANSFERENCIA DE RESINA (RTM)	17
4.3	FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH POR RTM.....	20
4.3.1	Materias primas para RTM.....	20
4.3.2	Procesamiento por RTM	27
5	MEDICIÓN DE PERMEABILIDAD	31
5.1	ESTADO DEL ARTE DE PERMEABILIDAD	31
5.2	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	41
5.2.1	Materiales	41
5.2.2	Diseño y fabricación del molde.....	42
5.2.3	Procedimiento.....	45
5.2.4	Modelación	49
5.3	RESULTADOS DE PERMEABILIDAD	50
5.4	COMPARACIÓN EXPERIMENTO VS MODELACIÓN.....	56
5.5	CONCLUSIONES.....	60
6	FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAMINADOS TIPO SÁNDWICH.....	63
6.1	DISEÑO DEL MOLDE	63
6.2	SIMULACIÓN DEL LLENANDO.....	66
6.3	FABRICACIÓN DEL MOLDE	69
6.3.1	Materiales	70
6.3.2	Procedimiento de fabricación del molde.....	72
6.4	FABRICACIÓN DE LAMINADOS.....	75
6.4.1	Materiales y equipos.....	76
6.4.2	Proceso de fabricación.....	77
6.5	CARACTERIZACIÓN DE LOS LAMINADOS	79

6.5.1	Termografía infrarroja.....	80
6.5.2	Microscopia óptica.....	84
6.5.3	Caracterización mecánica	87
6.6	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	89
6.6.1	Relación entre la presión de inyección y propiedades mecánicas.....	89
6.6.2	Inspección previa a ensayos mecánicos.....	92
6.6.3	Pasos para la detección defectos en materiales tipo sándwich mediante termografía IR	103
6.7	CONCLUSIONES.....	105
7	CONCLUSIONES.....	107
8	BIBLIOGRAFÍA	110

Lista de figuras

Figura 1	Prótesis de alto rendimiento fabricado en material compuesto	11
Figura 2	Arquitectura típica de un material compuesto tipo sándwich	16
Figura 3	Esquema del proceso de RTM	18
Figura 4	Núcleo <i>Lantor Soric XF</i> , ideal para ser utilizado en RTM e infusión	25
Figura 5	a) Imagen de la fabricación de preforma en fibra de carbono par al construcción de perfil curvo por RTM. b) Ilustración de ángulo de trenzado en preformas	26
Figura 6	Diferentes tipos de inyección: a) de borde, b) de punto (este caso central) y c) perimetral	27
Figura 7	Fenómeno durante la inyección conocido como “race tracking”	28
Figura 8	Flujo no uniforme en la pieles de un material tipo sándwich	29
Figura 9	Representación grafica de los dos métodos utilizados mara la medición de la permeabilidad en refuerzos utilizados para RTM. a) Método unidireccional y b) Método radial	33
Figura 10	Diagrama de flujo utilizado para la validación de un nuevo procedimiento para la medición de la permeabilidad	36
Figura 11	Ilustración de la identificación del radio del frente de flujo y de inyección durante el desarrollo de un ensayo radial	39
Figura 12	Representación del molde utilizado para la medición de permeabilidad en las diferentes telas de refuerzo	44
Figura 13	Ubicación de las prensas de cierre del molde durante una inyección en vacío	45
Figura 14	Esquema del proceso utilizado para la medición de la permeabilidad	46
Figura 15	Montaje real del proceso utilizado para la medición de la permeabilidad	47
Figura 16	a) Alta formación de burbujas durante la inyección. b) Disminución de burbujas por ajustes en la máquina de RTM	48
Figura 17	Enmallado del molde utilizado para la medición de permeabilidad en <i>FLOW-3D</i>	49
Figura 18	Recta de ajuste para encontrar f_{iso} de la tela Mat núcleo 1	50
Figura 19	Valores de permeabilidad experimentales de los refuerzos analizados a diferentes niveles de porosidad	51
Figura 20	Imagen de la geometría del frente de flujo para los diferentes refuerzos analizados, a) Mat nucleo, b) Mat y c) Woven	55
Figura 21	Irregularidades en el frente de flujo sobre telas de fibras discontinuas a diferentes números de capas realizados por S. Comas-Cardona et al., a) 1 tela, b) 2 telas, c) 4 telas y d) 8 telas	56
Figura 22	Imagen de una de las simulaciones por CFD en <i>Ansys Cfx</i> , en donde se aprecia la forma circular del frente de flujo	57

Figura 23	Imagen de una de las simulaciones por CFD en <i>FLOW- 3D</i> , en donde se aprecia la forma circular del frente de flujo	58
Figura 24	Errores en los tiempos de llenado tiempos entre la simulación y el experimento para una distancia radial 18 cm de de los refuerzos analizados	59
Figura 25	Secuencia de formación de una línea de avance rápido del frente de flujo	59
Figura 26	Secuencia comparativa de las posiciones del frente de flujo de los ensayos experimentales para una tela no tejida con núcleo versus la simulación en Flow 3D ...	60
Figura 27	Ilustración del sistema de inyección perimetral utilizado en un molde para fabricar laminados cuadrados	64
Figura 28	Ilustración de un corte transversal del diseño de la configuración del molde. Las flechas azules indican la ubicación de canal perimetral	65
Figura 29	Secuencia de imágenes de la simulación realizada en FLOW-3D del llenado del molde a una presión de 4 psi (0,276 bar)	68
Figura 30	a) Lámina de PE UHMW empleada para generar la cavidad del molde. b) Cera calibrada utilizada para generar relieves del molde	70
Figura 31	Coremat® utilizado para la fabricación de la cara lisa del molde	71
Figura 32	a) Insertos utilizados para el puerto de inyección y salida de resina. b) Sello en forma de champiñón del molde	71
Figura 33	Imagen del modelo positivo finalizado	73
Figura 34	Imagen del proceso de pulido de las fibras sobresalientes luego de cada laminado	74
Figura 35	Imagen del proceso de de retirado de los elementos del modelo positivo del cara superior del molde	74
Figura 36	Imagen de parte interna de la cara superior con la cavidad luego de retirado de los elementos del modelo positivo	75
Figura 37	Núcleo empleado para la fabricación de los laminados tipo sándwich	76
Figura 38	a) Panel de control para la inyección. b) Equipo de inyección utilizado para la fabricación de laminados	77
Figura 39	Molde empleado para la fabricación de laminados tipos sándwich listo para ser inyectado	78
Figura 40	Placas fabricadas a tres diferentes presiones: a) 8, b) 13 y c) 20 psi	79
Figura 41	Cámara infrarroja utilizada para la visualizar problemas en los laminados	80
Figura 42	Horno empleado para calentamiento de laminados para ensayos de termografía	81
Figura 43	Termografía del laminado de prueba con defecto central (b) y delaminaciones (a)	82
Figura 44	Aplicación del revelador en la superficie de las placas para disminuir el brillo	82
Figura 45	Comparación entre placas sin pintar y matizada	83
Figura 46	Montaje empleado para los ensayos utilizando una caja de cartón	84

Figura 47	Microscopio utilizado para la identificación de defectos	85
Figura 48	Forma de los cortes transversales al espesor en los laminados fabricados	86
Figura 49	Marcación en la sección transversal de las probetas para la observación al microscopio	86
Figura 50	Maquina universal <i>Instron</i> utilizada para la los ensayos de flexión a tres puntos	87
Figura 51	a) Aplastamiento del núcleo presentado en el primer ensayo de prueba. b) "Pad" utilizado para minimizar el aplastamiento del núcleo en los ensayos de flexión	88
Figura 52	Fallo por delaminación de las probetas sometidas a flexión	91
Figura 53	Fallo de probeta de placa de 13 psi, debido a zona seca en la parte superior	92
Figura 54	Fallo de probeta de placa de 20 psi, debido a zona de seca en la parte inferior	92
Figura 55	Representaciones graficas de las porosidades obtenidas en la placa de 8 PSI. a) Ala superior (salida resina en el molde) y b) Ala inferior	93
Figura 56	Figura 56. Fotografía de una de las alas de la placa inyectada a 8 PSI, donde se evidencia el tamaño y geometría de los poros encontrados	94
Figura 57	Representaciones graficas de las porosidades obtenidas en la placa de 13 PSI. a) Ala superior (salida resina en el molde) y b) Ala inferior	95
Figura 58	Fotografía de la cantidad de poros encontrados en la lamina de 13 psi.	96
Figura 59	Representaciones graficas de las porosidades obtenidas en la placa de 20 PSI. a) Ala superior (salida resina en el molde) y b) Ala inferior	97
Figura 60	Grafica de porosidad vs presión de inyección por caras superior e inferior	99
Figura 61	Termografías de la placa inyectada a 8 PSI. a) Ala superior (salida resina en el molde) y b) Ala inferior	100
Figura 62	Termografías de la placa inyectada a 13 psi. a) Ala superior (salida resina en el molde) y b) Ala inferior	101
Figura 63	Termografías de de la placa inyectada a 20 psi. a) Ala superior (salida resina en el molde) y b) Ala inferior	102

1 RESUMEN

Los laminados de plásticos reforzados tipo sándwich son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones en la industria del transporte terrestre, marítimo y aeroespacial, debido principalmente a su elevada relación resistencia/peso. Sin embargo, la fabricación de este tipo de materiales complejos con un elevado grado de calidad y niveles de producción aceptables, solo es posible por técnicas de fabricación avanzadas, como es el caso del moldeo por transferencia de resina (RTM), que consiste en inyectar la resina líquida en un molde cerrado, donde previamente se ha introducido el refuerzo seco, lográndose la impregnación. El objetivo de este trabajo consistió en establecer los parámetros básicos para la fabricación de este tipo de materiales que permita un correcto llenado del molde y óptimas propiedades mecánicas, apoyándose en la dinámica computacional de fluidos (CFD) para comprender el comportamiento del frente de flujo en el molde. Para lo que fue necesario realizar un análisis de la permeabilidad en diferentes refuerzos, y con estos resultados diseñar y fabricar un molde para laminados planos tipo sándwich. Se obtuvieron laminados mediante el molde diseñado, para establecer el efecto de algunas condiciones de procesamiento en las propiedades mecánicas y morfológicas, utilizando para caracterizar este último la termografía infrarroja y la microscopía óptica. Los resultados de este estudio permitieron identificar que para la obtención de laminados con óptimas características mecánicas no solo es posible a partir de un molde bien diseñado, si no que hace falta una buena selección de parámetros de procesamientos como la presión de inyección. Adicionalmente, la termografía infrarroja es una buena herramienta para identificar defectos presentes en los laminados, si se saben interpretar adecuadamente los termogramas. Finalmente, las simulaciones computacionales son un buen apoyo para la construcción del molde, ya que permiten conocer de manera general el comportamiento del frente de flujo, aunque programas no especiales para RTM omiten algunos problemas muy comunes en el proceso.

Palabras claves: MATERIALES COMPUESTOS, SÁNDWICH, FABRICACION, RTM, PERMEABILIDAD, SIMULACIÓN, CFD.

2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar las principales variables y consideraciones a tener en cuenta para la fabricación de materiales compuestos tipo sándwich por la técnica de RTM, con la finalidad de resolver algunos problemas presentes en la implementación de este tipo de arquitectura y proceso productivo.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar mediciones de permeabilidad en diferentes refuerzos de fibra de vidrio utilizando parámetros reales de procesamiento, que permitan obtener medidas precisas de esta propiedad y el comportamiento del frente de flujo.
- Establecer las condiciones y procedimientos óptimos para la fabricación de laminados tipos sándwich por RTM con la menor cantidad de defectos
- Diseñar y fabricar un molde para la obtención de laminados de material compuesto de matriz polimería tipo sándwich, utilizando como apoyo un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD).
- Analizar el efecto de la presión de inyección en la fabricación de laminados tipo sándwich en las características morfológicas de los laminados, y su relación con sus propiedades mecánicas finales.
- Identificar por medio de técnicas de caracterización tanto destructivas como no destructivas los defectos más comunes presentes en la fabricación de laminados tipos sándwich.

3 INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son ampliamente utilizados en múltiples campos de aplicación, y han venido reemplazando cada vez más a materiales tradicionales como el acero. Actualmente se producen desde grandes objetos como cascos de embarcaciones y tubos de conducción de agua para ciudades, hasta elementos deportivos pequeños como arcos, raquetas y skies. Uno de los atributos de este material que han propiciado su gran crecimiento, especialmente en el sector del transporte y el deporte, es su elevada resistencia específica, es decir un nivel de resistencia elevado con un bajo peso. También en el campo de la medicina se ha aprovechado esta cualidad para poder dotar no solo de movimiento a personas que han perdido sus piernas, si no de agilidad y potencia a corredores de alto rendimiento con esa misma discapacidad, en la figura 1 se muestra una prótesis para pierna de la marca *össur* de la referencia cheetah®.



Figura 1. Prótesis de alto rendimiento fabricado en material compuesto¹.

Un material compuesto puede definirse como la unión de dos o más materiales para obtener propiedades que no son posibles de obtener de los materiales originales². Estos se componen básicamente de una fase continua (matriz) y una discontinua (refuerzo). Las matrices empleadas pueden ser metálicas, cerámicas y poliméricas, estas últimas son las más utilizadas por ventajas relacionadas con su baja densidad y

¹ <http://www.ossur.com/?PageID=13462>

² Askeland, D. Ciencia e ingeniería de los materiales. Thompson. Cuarta edición. 2004.

fácil procesamiento. Estas son generalmente reforzadas con diferentes fibras y partículas. Este tipo de configuración se conoce como: plástico reforzado o material compuesto de matriz polimérica.

Las matrices del tipo termoestable se emplean comúnmente para la fabricación de piezas en plástico reforzado, especialmente resinas de poliéster, viniléster y epóxicas; y pueden ser reforzadas por diferentes fibras sintéticas, como son fibras de vidrio, de carbono y de aramida, según el tipo de requerimiento funcional. A nivel local las resinas de poliéster insaturado (UP) son las de mayor consumo, debido a su bajo costo, y rapidez en el curado, y principalmente son reforzadas con fibras de vidrio para fabricar todo tipo de estructuras, como, bañeras, cabinas telefónicas, tanques de almacenamiento, partes automotrices, y marítimas, entre otras.

Existen algunas aplicaciones en donde es necesario obtener una mayor relación resistencia/peso; como por ejemplo el caso de algunas partes de una aeronave, y configuraciones simples de estos materiales (solo matriz y refuerzo) no alcanzan a satisfacer completamente este requerimiento adicional, por lo que se puede recurrir a otro tipo de configuraciones, como las tipo sándwich, que están compuestas básicamente por capas externas de resina reforzadas con fibra y en el interior un núcleo liviano, que le confieren características especiales al material, que no es posible obtener con otro tipo de configuración.

Para la producción de plásticos reforzados tipo sándwich existen gran variedad de técnicas de transformación que permiten obtener diferentes niveles de calidad, producción, formas y porcentaje de refuerzo, algunas de las técnicas empleadas comúnmente son laminación manual, moldeo en bolsa de vacío, moldeo por compresión e infusión. Otra de las técnicas utilizadas para la fabricación de este tipo de materiales, es la técnica del moldeo por transferencia de resina (RTM), que posee algunas ventajas frente a las otras técnicas, como mayores niveles de productividad, baja tolerancia dimensional y la obtención de un buen acabado superficial en todas las caras, entre otras. Este proceso productivo consiste en inyectar resina catalizada a presión en un molde cerrado, para la impregnación del refuerzo o preforma que se encuentre de manera seca, y que fue previamente dispuesta en el interior del molde, antes de cerrarlo.

El RTM presenta innegables ventajas frente a otras técnicas de manufactura de materiales compuestos, pero su implementación a nivel industrial presenta grandes desafíos, como lo son el diseño y fabricación de un molde que permita un completo llenado del mismo, con la menor cantidad de defectos y en el menor tiempo, ya que para obtener tan primordial objetivo, el diseño del molde debe tener definidas

variables como el lugar y tipo de inyección, lugar y número de puertos de venteo o salidas de aire, entre otros factores. En la literatura existe información limitada en estos aspectos, ya que para cada geometría de la pieza a fabricar, tipo de refuerzo y configuración utilizado plantea diferentes variables de diseño del molde, por lo que se recurre generalmente a la asesoría de personas con experiencia empírica en la fabricación de este tipo de moldes, o si se dispone con más recursos físicos, tiempo y de personal capacitado se procede a realizar simulaciones previas en programas de dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar el llenado antes de proceder con la fabricación del molde^{3 4}.

Al momento de realizar simulaciones del llenado del molde utilizando alguna herramienta de elementos finitos es indispensable contar con características del proceso, como lo son la permeabilidad y el patrón de flujo. La permeabilidad del refuerzo es un parámetro que se debe introducir en la mayoría de programas comerciales para poder generar la simulación. Existen múltiples medidas de la permeabilidad reportadas en diferentes estudios, pero para que las simulaciones sean representativas (ajustadas a la realidad), se deben utilizar valores de permeabilidad precisos, y no valores reportados en la literatura, ya que estos son realizados bajo condiciones ideales de laboratorio y no tienen en cuenta algunos fenómenos reales. Por lo que es importante la realización de un estudio previo inicial efectuando la medición de la permeabilidad en condiciones reales de los posibles refuerzos a utilizar, para obtener condiciones que permitan una buena aproximación al molde ideal.

Por otro lado, un molde correctamente diseñado no necesariamente producirá piezas con pocos defectos, también es indispensable determinar condiciones de procesamiento reales, ya que aun con el uso de programas para la simulación de gran precisión y uso de medidas precisas de permeabilidad, aun existen diferencias notorias en los resultados obtenidos en la simulación y los que se presentan en la práctica.

Adicionalmente a estos desafíos ya complejos en estructuras simples en donde solo se requiere impregnar el refuerzo, el hecho de incorporar un núcleo o un material diferente al refuerzo a impregnar (insertos u otros), como son los materiales compuestos tipo sándwich, añade otros elementos a ser considerados para el

³ Sanchez, F. A process performance index based on gate-distance and incubation time for the optimization of gate locations in liquid composite molding processes. *Composites: Part A*, Vol. 37 (2006), p. 903–912

⁴ <http://www.esi-group.com/products/composites-plastics/pam-rtm/>

desarrollo del molde, la simulación y las condiciones mismas de fabricación de las piezas o laminados.

Este proyecto tiene como finalidad el análisis de las variables más importantes para implementación del moldeo por transferencia de resina en la fabricación de laminados tipo sándwich, como lo son:

- ✓ Medición de la permeabilidad de los refuerzos utilizados que permitirá conocer el patrón de flujo y la manera cómo impregnará la fibra.
- ✓ La simulación por elementos finitos del llenado del molde.
- ✓ La construcción y diseño del molde para la obtención de laminados planos tipo sándwich.
- ✓ La caracterización mecánica y morfológica de laminados obtenidos.
- ✓ Análisis de algunas condiciones de procesamiento.

4 FABRICACIÓN DE LAMINADOS TIPO SÁNDWICH POR RTM

En este capítulo se describen las generalidades de los materiales compuestos tipo sándwich, así como la técnica de fabricación RTM y algunas consideraciones en el procesamiento de estos materiales, como lo son las materias primas específicas, problemas comunes y parámetros de procesamiento.

4.1 MATERIALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH

Actualmente una variedad de materiales compuestos ha ganado gran relevancia en el sector del transporte marítimo, terrestre y aeroespacial, y en general todos los sectores donde se requiera una elevada relación resistencia-peso y absorción de energía ante impactos, y son estos los materiales compuestos de matriz polimérica tipo sándwich. Estos materiales están formados por pieles delgadas de un material de recubrimiento (plástico reforzado) unido a un material de relleno ligero, como puede ser el caso de una espuma polimérica. Estos dos materiales por separado no son rígidos o resistentes, pero el material resultante sí presenta estas propiedades².

El material ligero central se conoce como núcleo o rigidizante, y este se incorpora en el material para crear volumen en el interior, aumentando el momento de inercia de la sección sin aumentar el peso de manera significativa⁵, aunque en aplicaciones específicas se utilizan para dotar a las estructuras de características de aislamiento térmico o acústico. Como se aprecia en la figura 2, el material compuesto está conformado por dos pieles (generalmente plástico reforzado) y un elemento núcleo liviano en el interior, como lo son: espumas poliméricas y estructuras tipo panal de abeja, entre otros.

⁵ Miravete, A. Materiales compuestos. Tomo I y II. INO reproducciones. 2000.

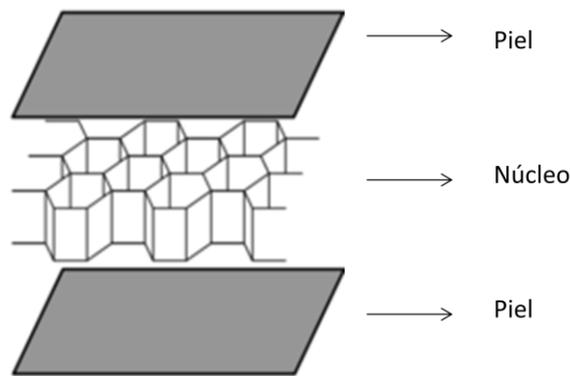


Figura 2. Arquitectura típica de un material compuesto tipo sándwich⁶.

Existen gran variedad de núcleos utilizados en plásticos reforzados para diferentes propósitos, entre los más utilizados se encuentran:

- Las espumas a partir de polímeros termoestables: Resinas fenólicas y de poliuretano son materiales empleados para su fabricación. Estas además de ofrecer múltiples rangos de densidades también ofrecen ventajas de aislamiento térmico.
- Las estructuras tipo panal de abeja o “Honeycombs”, las cuales son fabricadas en diversos tipos de materiales, como el aluminio, papel kraft impregnado con resina fenólica, aramida, polipropileno, entre otros. Las propiedades de estas están determinadas por la densidad, tamaño y forma de la celda y el espesor de pared.
- Las maderas, en particular madera de balsa, que es el elemento núcleo más antiguo y económico, que aunque está siendo remplazado por las espumas poliméricas, aun es común su utilización en la fabricación de embarcaciones.
- Elementos sólidos rígidos de polímeros de relativa baja densidad, como por ejemplo Polietileno de alta densidad (HDPE).

Uno de los principales inconvenientes o limitantes de los materiales compuestos sólidos de matriz polimérica es una limitada absorción de energía durante algún impacto. En aplicaciones automotrices, o de transporte en general, el tema de absorción de energía ante impactos es de gran relevancia, dado que la seguridad de los ocupantes depende en gran medida de este factor. La incorporación de elementos tipo

⁶ <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/CompositeSandwich.png>

núcleo de baja densidad en estos materiales mejora su comportamiento y lo potencian para su utilización en este tipo de aplicaciones⁷.

La técnica del moldeo por transferencia de resina (RTM) fue utilizada en este estudio para fabricación de laminados de plástico reforzado tipo sándwich, por lo que se describirá a continuación.

4.2 MOLDEO POR TRANSFERENCIA DE RESINA (RTM)

El uso de la técnica de moldeo por transferencia de resina (RTM) para la elaboración de materiales compuestos avanzados de matriz polimérica es relativamente reciente, a finales de 1970 se construyeron por esta técnica diferentes componentes, como son el caso de aspas en motores para la industria aeronáutica. En la mayoría de estas aplicaciones se recurrió al RTM debido a la necesidad de altos niveles de precisión en la geometría y esta sigue siendo una de las importantes ventajas detrás de la técnica para el desarrollo de ciertos componentes. Posteriormente a 1980 surgió gran interés en este proceso de manufactura para elaborar componentes aeroespaciales⁸.

Este proceso de transformación se encuentra clasificado en las técnicas de moldeo líquido de compuestos (LCM), en donde la resina en forma líquida se hace fluir hacia una cavidad sellada. También en este grupo se encuentra clasificada la técnica de infusión, también conocida como VARTM (*Vacuum assisted resin transfer molding*) ó RIFT (*Resin infusion flexible molding*), en las que la resina es obligada a fluir dentro del molde cerrado (una cara rígida y otra flexible) por medio de vacío, pero cuando este proceso se realiza a presiones por encima de las atmosféricas la técnica y en moldes cerrados rígidos se conoce como RTM, moldeo por transferencia de resina.

El RTM se define como un proceso de fabricación de molde cerrado a baja presión que permite obtener piezas de material compuesto en un amplio rango de complejidad y tamaño, así como elementos de altas prestaciones mecánicas. Este proceso se diferencia de otros procesos de moldeo, en que el refuerzo seco y la resina se unen dentro de un molde, para consolidar una pieza de material compuesto. El refuerzo que puede estar preformado o no, se coloca dentro de la cavidad del molde,

⁷ Warrior, N. A. Effect of resin properties and processing parameters on crash energy absorbing composite structures made by RTM. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2003.

⁸ Potter, K. Resin transfer moulding. Chapman & Hall. 1997. Pag 48 -49.

posteriormente este es cerrado, y por medio de un conducto la resina es bombeada o transferida desde un depósito hasta el molde para impregnar la fibra, en donde finalmente se produce el curado⁵, el esquema del proceso se muestra en la figura 3.

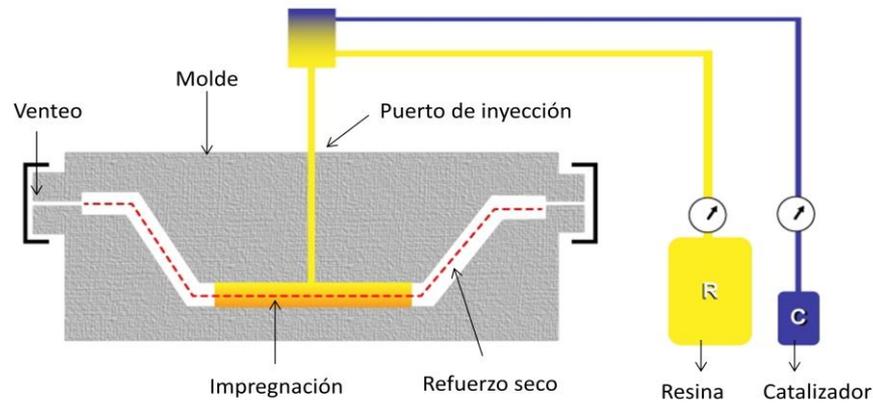


Figura 3. Esquema del proceso de RTM⁹.

La técnica de RTM presenta varias ventajas con respecto a otros procesos de manufactura de plásticos reforzados⁸, entre las más importantes se encuentran:

- ✓ Las dimensiones de la pieza a fabricar son controladas por la cavidad y rigidez del molde.
- ✓ Es posible fabricar diversas formas, incluso formas complejas, lográndose la eliminación de operaciones de terminación.
- ✓ Múltiples posibilidades para el uso de refuerzos, tejidos 3D y preformas.
- ✓ Pueden ser utilizados una amplia variedad de sistemas de resinas.
- ✓ Para moldes rígidos, la fracción del volumen de fibra puede ser controlada adecuadamente, lográndose propiedades mecánicas consistentes.
- ✓ La porosidad y los vacíos en piezas pueden ser controlados con un correcto diseño del molde y un buen control del proceso.

Otro de los aspectos de gran relevancia del proceso es la baja emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOC) debido a la utilización de moldes cerrados, y dado que en la mayoría de países industrializados existe una nueva legislación referente a emisiones

⁹ http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/RTM_process.png

de compuestos orgánicos volátiles¹⁰, la mayoría de la industria de molde abierto esta migrando a procesos más limpios, como lo son los de molde cerrado. Uno de los VOC de mayor generación en la industria de los plásticos reforzados es el estireno, debido a que es el solvente donde se encuentran disueltas resinas ampliamente utilizadas como el poliéster y las viniléster, pero tienen conocidos efectos nocivos en la salud humana¹¹.

A nivel económico, el proceso RTM se convierte en una importante técnica a considerar, debido a un relativo bajo costo de las materias primas, comparadas con técnicas de alta calidad que utilizan pre-impregnados, estos últimos presentan un precio por unidad de masa de un 30 a un 50% mayor que las materias primas utilizadas en RTM. Las técnicas en donde se utilizan preimpregnados se convierten en técnicas costosas por factores como: alta inversión, bajas velocidades de producción y altos costos de los materiales auxiliares, como películas y pieles (consumibles del proceso). En cuanto al RTM, el costo está básicamente afectado por el sistema de resinas y las preformas o refuerzos utilizados¹².

Este tipo de moldeo líquido de compuestos y sus procesos derivados han ganado gran popularidad en la industria aeronáutica, automotriz, militar y de infraestructura; y en general en áreas donde se requiera alta producción. Al comparar el RTM con procesos como infusión que permiten también la incorporación de altos contenidos de fibra y alta calidad, esta última solo es útil para la producción de un bajo número de piezas o la fabricación de prototipos¹⁰, pero el RTM se convierte rentable e idónea para un número de piezas entre 500 y 50000 por año, como sería el caso de la industria automotriz, donde se requiere alta producción a un bajo costo. También esta técnica es ideal para los niveles de producción de la industria aeronáutica de 50 a 5000 piezas por año, en donde se requiere alto rendimiento más que un elevado volumen de producción.

Otro aspecto importante, es concerniente a la manera en cómo estará dispuesto el refuerzo al interior del molde, esta disposición afectará tanto la calidad y la resistencia de la pieza final como los parámetros de procesamiento. Por ejemplo, la estructura o arquitectura de la preforma debe ser diseñada pensando no sólo en la carga mecánica

¹⁰ Rudd, C. D. ASM Handbook composites. Volumen 21. 2001.

¹¹ Schettle, T. Generations at Risk: Reproductive Health and the Environment. Massachusetts institute of technology. 1999.

¹² Kruckenberg, T. M. Resin transfer moulding for aerospace structures. Kluwer academic publishers. 1998.

que la pieza final va a soportar, sino también pensando en la influencia que va a tener la estructura en la permeabilidad.

El tiempo de llenado del molde es otra importante variable de procesamiento, ya que de esta dependerá en gran medida la eficiencia del proceso, y se encuentra influenciado por el tipo de resina, su viscosidad, y la temperatura de procesado. Adicionalmente, cuando se pretende incrementar la rapidez del proceso de inyección para disminuir el tiempo de inyección, se debe tener en cuenta la integridad de la estructura de las telas, evitando que las fibras se muevan durante el llenado del molde⁵. En definitiva, para lograr un proceso de inyección rápido y que produzca la menor movilidad de fibra (pocos defectos), debe existir un adecuado balance y control de las diferentes condiciones de procesamiento.

4.3 FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH POR RTM

El objetivo principal del moldeo por transferencia resina es lograr una completa impregnación del refuerzo seco al interior del molde en el menor tiempo posible, para lo cual se debe contar con materiales específicos para tal fin y comprender algunos fenómenos particulares que se presentan en el procesamiento. Las características de las materias primas utilizadas para la fabricación de piezas por RTM y consideraciones importantes para su procesamiento serán descritas en esta sección.

4.3.1 Materias primas para RTM

- Resinas

La selección de la resina para RTM está influenciada por la aplicación específica de la pieza final y los requerimientos del proceso. En el primer caso, los factores a tener en cuenta están relacionados con las características mecánicas, resistencia ambiental, costo y comportamiento a altas temperaturas, entre otros factores, por lo que existen en el mercado diversos sistemas de resina utilizada entre las que se encuentran: poliéster, viniléster, epóxicas, fenólicas y bismaleimidias (BMI). Las resinas de poliéster tradicionales se utilizan básicamente en aplicaciones en donde las exigencias mecánicas, térmicas y químicas no son elevadas y el costo es un factor primordial, las viniléster por su parte se utilizan en donde una mayor resistencia química y térmica es requerida. Cuando es necesario propiedades mecánicas elevadas se recurre a las epóxicas. Por otro lado, las resinas fenólicas proporcionan una buena relación costo y resistencia al fuego, y cuando es importante la resistencia a elevadas temperaturas y al

fuego, buenas propiedades mecánicas y fácil procesamiento se recurre a las BMI, con el único inconveniente relacionado con su elevado costo⁸.

Uno de los principales requerimientos a la resina para ser posible la utilización en la técnica de RTM es la viscosidad. La resina debe presentar una baja viscosidad para que durante el proceso de inyección todo el volumen del refuerzo seco o preforma sea completamente impregnado sin la necesidad de utilizar altas presiones de inyección. La fracción volumétrica de la preforma y el volumen a ser impregnado también hacen parte importante de las consideraciones a tener en cuenta en la determinación de la viscosidad necesaria de la resina, una fracción volumétrica baja de fibra presenta una mayor permeabilidad a la resina que preformas con altos contenidos de fibra.

Se recomienda para el moldeo líquido usar resinas que no presenten viscosidades mayores a 0.5 Pa*s (500 centipoises) durante moldeo. Este valor máximo de viscosidad es particularmente empleado para impregnar preformas con altos contenidos de fibra utilizados en la industria aeroespacial mediante presiones o temperaturas elevadas, que requieren moldes de alta rigidez y presentando comúnmente problemas de impregnación [10]. En general, cuanto más alta es la presión de la inyección, más alto es el costo de los moldes, debido a que requieren una mayor rigidez.

Los valores de viscosidad generalmente utilizados están comprendidos entre valores en el rango de 0.1 y 0.3 Pa*s (100 - 300 centipoises) con un valor máximo cerca de 0.5 Pa*s que es el límite superior, como se mencionó anteriormente, para ciertas aplicaciones especiales. Normalmente, la resina es mezclada con el catalizador antes de ser inyectada en el molde, o en casos muy especiales, la resina es un sólido en la temperatura ambiente con un agente endurecedor latente, que debe ser fundida antes de la inyección. La desgasificación de la resina antes de la inyección mediante vacío es una buena práctica para remover aire atrapado en resinas no disueltas en sustancias volátiles, como el estireno, y durante la inyección asistir el proceso por medio de vacío ayuda adicionalmente a remover la humedad, aire y volátiles, mejorando significativamente la calidad del producto, reduciendo la aparición de vacíos y la porosidad. Los sistemas epóxicos y las bismaleimidias son idóneos para RTM debido a que no generan volátiles durante el curado, disminuyendo la aparición de vacíos y poros. En países desarrollados existen una gran cantidad de proveedores de estos sistemas, aunque a nivel nacional es limitado su uso¹³.

En general, los aspectos claves para obtener una buena impregnación del refuerzo en RTM son los siguientes:

¹³ Tong, L. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites. El sevier. 2002. Pag 48

- ✓ Una baja viscosidad que permita a la resina fluir fácilmente a través del refuerzo y lograr una impregnación adecuada.
- ✓ Suficiente “pot life”, que está relacionado con mantener una viscosidad razonablemente baja durante el tiempo de inyección, para la utilización de presiones de inyección igualmente bajas.
- ✓ Un contenido volátil bajo para reducir al mínimo la ocurrencia de vacíos y poros.
- ✓ Tiempo y temperatura razonables de curado para desmoldar la pieza en un corto tiempo completamente curada.

Aunque las presiones de inyección de la resina asistida por vacío puedan ser aplicadas hasta un rango entre 400-500 psi (27,58 – 34,47 bar), las presiones aplicadas son normalmente de 100 PSI (6,89 bar) o más bajas. Para ciertas aplicaciones se requieren altas presiones de inyección para impregnar completamente la preforma, pero cuanto más alta es la presión de la inyección, mayor posibilidad de la migración de la preforma, es decir, el frente de flujo arrastra la fibra fuera de su localización deseada. Calentar la resina o el molde antes o durante la inyección se puede utilizar para reducir la viscosidad pero también reducirá el periodo de funcionamiento o “pot life” de la resina.

Una de las resinas comúnmente empleadas en la fabricación de piezas de un nivel de resistencia estructural medio y bajo, son las de poliéster, debido a su bajo costo y fácil modificación se han convertido en una de las resinas más utilizadas en la fabricación de piezas por RTM, a continuación se describen algunas de sus características.

Resinas de poliéster insaturado (UP)

Las resinas UP constituyen uno de los polímeros termoestables de más uso, ya que ofrecen un buen balance entre propiedades como lo son: un relativo bajo costo y que se adaptan fácilmente a la mayoría de procesos de fabricación. Sin embargo, una de las principales desventajas de este tipo de resinas es su fragilidad y alta contracción durante el curado. Este último aspecto es de gran importancia en piezas elaboradas en RTM que requieran alto nivel de tolerancia en sus dimensiones. Para mejorar este

inconveniente en las resinas de poliéster insaturado existen modificadores de contracción o conocidos como aditivos LPA o en inglés: “Low Profile Aditives”¹⁴.

Modificadores de contracción

La alta contracción es contrarrestada con la adición de polímeros termoplásticos. Entre los más utilizados se encuentra el poliacetato de vinilo (PVA), el polimetilmetacrilato de metilo (PMMA) y el poliestireno (PS). En muchos casos no solo tienen efecto en la contracción, sino que además le confieren a las piezas moldeadas una gran calidad superficial. Recientemente se han desarrollado aditivos LPA del tipo elastoméricos, que además de reducir o eliminar completamente la contracción durante el curado, logran un aumento en la tenacidad del compuesto, ampliando la posibilidad para nuevas aplicaciones¹⁴.

En la industria automotriz en muchos casos se requiere fabricar grandes piezas en poliéster reforzado con fibra de vidrio por RTM, como lo son partes de la carrocería, y en estas aplicaciones no solo se necesita asegurar dimensiones precisas de la pieza que facilitaran su posterior ensamble, adicionalmente es indispensable que estos elementos fabricados posean un excelente acabado superficial para disminuir procesos posteriores de terminación. El acabado superficial es afectado por la concentración de los aditivos LPA, como lo menciona Palardy et al en su estudio¹⁵.

- Núcleos

Los núcleos utilizados para las técnicas de LCM (Moldeo líquido de compuestos), deben tener la propiedad de no permitir que la resina líquida rellene o impregne el material núcleo, por lo que es usual la utilización específica de núcleos con arquitecturas de celda cerrada. Para el uso de materiales tipo panal de abeja deben tener previamente adherido una película que actué como sello para no permitir el llenado del mismo. También se han utilizado películas adhesivas a ambos lados del núcleo en laminados pequeños y planos para sustituir las películas sellantes, aunque se requiere incluir el tiempo de curado del adhesivo en el ciclo del proceso, obteniéndose

¹⁴ De La Caba, K. Influencia de la temperatura de curado y del contenido de modificador en la conducta de curado y en las propiedades de resinas de poliéster insaturadas con diversas composiciones. Tesis de doctorado en ciencias químicas. San Sebastián. 1997.

¹⁵ Palardy, G. Optimization of RTM processing parameters for Class A surface finish. Composites: Part B 39 (2008) 1280–1286.

* Empresa fabricante de partes para la industria de la aviación comercial y civil.

paneles con resistencia similar a muchos paneles sándwich moldeados de manera convencional⁸.

Un tradicional material núcleo usado en la industria en general es la madera balsa, pero está siendo ampliamente remplazado por espumas sintéticas de diversos polímeros, como son el caso de la empresa *Dowty**, que para la fabricación de aspas en plástico reforzado para motores de aviación donde se necesita un núcleo con una forma específica, en formas fundidas de poliuretano (PU) están siendo ampliamente usadas, como por ejemplo aspas en la aviación y en vehículos de propósito especial. Como estos materiales luego de ser fundidos presentan una piel que limita la adhesión a la resina inyectada, esta debe ser removida previamente por corte o por abrasión por chorro. En general las formas fundidas de espumas de PU carecen de la resistencia de algunos otros tipos de espumas como las de PVC y PMI (polimetacrilimida).

Los bloques de espumas están siendo ampliamente usados en procesos de RTM avanzados, la espuma de PMI como la *Rohacell* tiene excelentes propiedades y está siendo utilizada en componentes operacionales en aviación. Las espumas de PVC son un material estándar en la industria marítima, estas espumas tienen que ser cortadas para darles forma, aunque alguna cantidad de ellas de tipo específico es posible darles forma por termomoldeado⁸.

Para aplicaciones particulares existen elementos núcleos que pueden presentar permeabilidad en ciertas zonas (canales), estos permitirán estabilizar y controlar de mejor manera el frente de flujo, y además de la formación de una estructura sólida tridimensional tipo panal de abeja luego del curado en el interior del núcleo, como lo son las ofrecidas por la empresa *Lantor*, en su referencia *Soric XF*¹⁶, ver figura 4.

¹⁶ http://www.lantor.nl/index.php/id_structuur/10599/soric.html



Figura 4. Núcleo *Lantor Soric XF*, ideal para ser utilizado en RTM e infusión¹⁷.

- Refuerzos

Existen gran variedad de fibras a utilizar en RTM, varios tipos de vidrio, de carbono y aramida. Estos pueden estar presentados en varias configuraciones textiles, como tejidos bidireccionales y tridimensionales, cosidos, entre otros. La selección de la arquitectura del refuerzo depende de varios factores que afectan el comportamiento en servicio como la rigidez, resistencia, durabilidad, compresibilidad; y también los relacionados con el procesamiento como permeabilidad, compresibilidad y deformabilidad⁵.

Existen refuerzos especialmente diseñados para incrementar la facilidad en la producción, uno de ellos es el Rovicore[®]. Este material es un sándwich compuesto por capas externas de telas tejidas o no tejidas discontinuas (mat) de vidrio, y en el núcleo capas unidireccionales del mismo material, que permite moldearlo fácilmente evitándose pasos como el preformado¹⁸.

A nivel local se encuentra un producto con características similares, ya que también es un refuerzo de fibra de vidrio, pero con un núcleo interior polimérico no tejido, que provee un espacio poroso para el flujo de la resina, y se conoce como manta moldeable para RTM. Este material a diferencia del Rovicore[®], no presenta propiedades de resistencia y rigidez elevadas.

Otro de los refuerzos utilizados para RTM y en múltiples procesos de moldeo líquido es el UNIFILO multiconform^{®19}, de *Owens Corning*, que al igual que la manta moldeable ya mencionada incluye un núcleo polimérico (en este caso polipropileno), pero con la

¹⁷ <http://www.easycomposites.co.uk/products/core-materials/lantor-soric-SF-3mm.aspx>

¹⁸ Rosato, D. Reinforced plastics handbook. Elsevier Ltda. 2004.

¹⁹ http://www.ocvreinforcements.com/pdf/products/UNIFILO_Multiconform_ww_03_2009_Rev2.pdf

diferencia en que capas externas de fibra de vidrio son filamentos continuos dispuestos aleatoriamente que ofrecen mayores propiedades mecánicas y flexibilidad al ubicarlo en el molde que los tradicionales mat de fibras discontinuas.

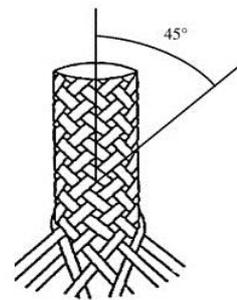
Debido a que por RTM se pueden fabricar formas complejas, es útil tener conformada las fibras o telas de acuerdo a la geometría que se desea obtener, ya que los tiempos necesarios para ubicación de telas o refuerzos en estas formas complejas puede ser dispendioso, y más aun si se quiere orientar las fibras en cierta dirección. Estos arreglos son conocidos como preformas.

Preformas

Las preformas pueden definirse como un arreglo de fibras de refuerzo a las cuales se les da una forma cercana a la geometría de la pieza final y se orientan de forma adecuada, para ser ubicadas fácil y rápidamente dentro del molde y ser posteriormente impregnadas por la resina⁵. Estos arreglos pueden ser construidos en gran variedad de arquitecturas y con la utilización de diferentes fibras. En la figura 5 a) se puede observar la fabricación de una preforma en fibras de carbono para la construcción de un perfil curvo por RTM.



a)



b)

Figura 5. a) Imagen de la fabricación de preforma en fibra de carbono para la construcción de perfil curvo por RTM²⁰. b) Ilustración de ángulo de trenzado en preformas²¹.

²⁰ http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/imac_pro_en.htm

²¹ <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353804001642>

Existen diferentes técnicas para la fabricación de preformas como los son el trenzado, tejido y embobinado entre otras, y cada una de ellas son seleccionadas de acuerdo al rendimiento mecánico requerido, estableciéndose parámetros como orientación de las fibras y densidad, que confieren diferentes comportamientos mecánicos y de flujos a través de ellas. En la figura 5 *b*) se puede observar el ángulo de trenzado en una preforma cilíndrica.

4.3.2 Procesamiento por RTM

El tiempo que toma la resina en llenar completamente el molde está influenciado por la viscosidad, la permeabilidad del refuerzo o preforma, la presión de inyección, el número y localizaciones de los puntos de inyección y del tamaño de la pieza a fabricar. Existen usualmente tres tipos de inyección de la resina en un molde, como se muestra en la figura 6. La primera consiste en la inyección de borde (fig. 6a), en donde se inyecta por un extremo del molde creándose un flujo unidireccional, y el punto de salida o de venteo se encuentra al otro extremo del molde. Otra forma consiste en la inyección de punto (fig. 6b), que generalmente se realiza de manera central, en donde la resina fluye radialmente hacia la parte perimetral del molde. Y por último, la forma perimetral (fig. 6c), donde la resina se inyecta en un canal alrededor de la pieza, y la resina fluye radialmente hacia el puerto de salida ubicado en el centro del molde²².

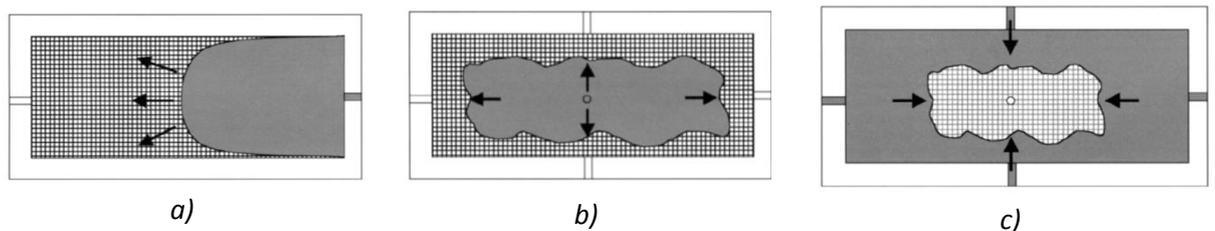


Figura 6. Diferentes tipos de inyección: *a*) de borde, *b*) de punto (este caso central) y *c*) perimetral²².

Generalmente el menor tiempo inyección se consigue en la de tipo perimetral, aunque no es extraño utilizar más de uno de estos métodos en algunas aplicaciones. Al igual

²² Campbell, F. Manufacturing Processes For Advanced Composites. El sevier (2004).

que la localización de los puertos de inyección, los puntos de salida o respiraderos son consideraciones importantes para lograr un llenado completo del molde y evitar sitios de aire atrapado, conocidos como puntos secos, en donde no se logra la impregnación de la resina. Existen varias maneras para reducir el tiempo de llenado, como son el caso de utilizar resinas de baja viscosidad o presiones altas de inyección, sin embargo, el método más eficaz es diseñar una inyección en donde la distancia que deba recorrer la resina sea la menor. Al diseñar la forma de inyección la consideración más importante consiste en tener un sistema que reduzca al mínimo cualquier zona de aire atrapado pues éstos darán lugar a áreas secas no impregnadas²².

Durante la etapa de inyección la resina tomará la trayectoria de menos resistencia, por lo que es importante que no existan aberturas entre el refuerzo y el molde o zonas con una mayor permeabilidad que el promedio, para evitar que la resina pueda avanzar más rápido por esas zonas que el frente de flujo. Este fenómeno es conocido como "race track", y genera áreas donde el aire queda atrapado y no puede escaparse, resultando en zonas secas o puntos no impregnados. Una imagen esquemática del fenómeno se muestra en la figura 7, donde en un molde rectangular es inyectada resina en el extremo izquierdo, y se crean líneas de avance rápido en sus bordes, generando la posibilidad de que cree una zona seca al final de la inyección.

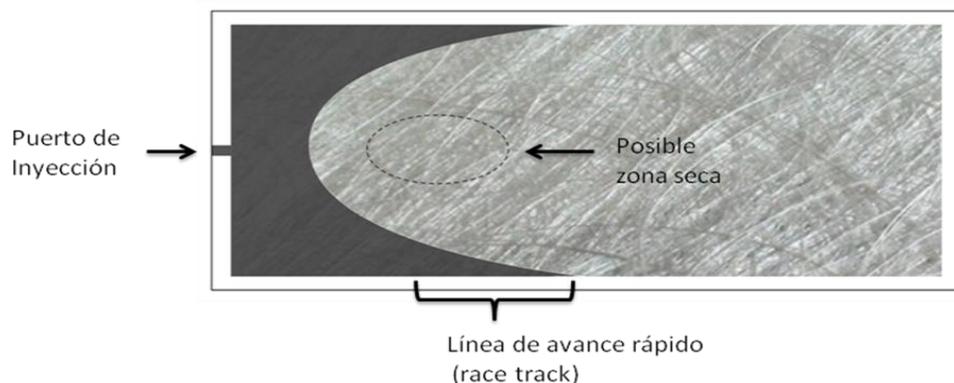


Figura 7. Fenómeno durante la inyección conocido como "race tracking".

El problema del "race tracking" ocurre más frecuentemente en los sistemas de inyección perimetrales que en los diseños de inyección de punto o de borde, y por lo general se evita con una selección adecuada de la localización y del número de orificios de salida o de venteo. Un fenómeno algo similar puede ocurrir también en los materiales tipo sándwich (ver figura 8), en donde la resina fluye más rápidamente a lo

largo de una superficie que en la otra, dando por resultado pieles de espesores no uniformes. Para evitar algunos de los problemas en la inyección con núcleos de espuma, los fabricantes realizan líneas de intersección en la superficie para proporcionar las trayectorias e incluso realizar agujeros para que la resina atraviese la espuma y permitir que se iguale la presión sobre ambos lados²².

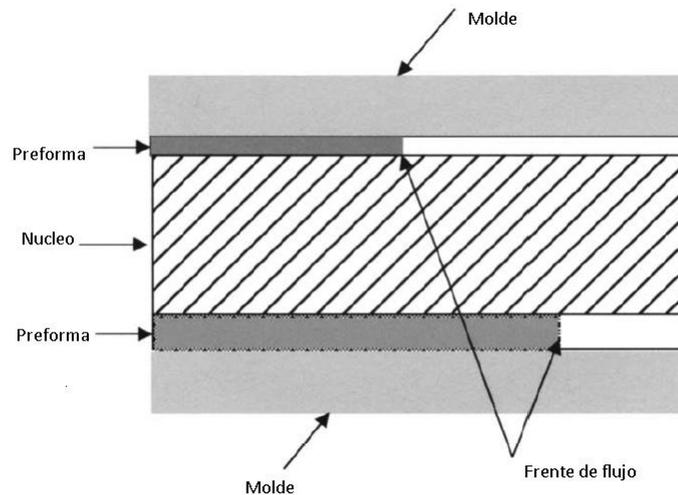


Figura 8. Flujo no uniforme en la piel de un material tipo sándwich²².

Una cantidad significativa de trabajos investigativos se han dedicado al modelamiento del proceso de llenado para moldes en RTM buscando la optimización del diseño del molde, estas simulaciones numéricas básicamente predicen la óptima ubicación de sitios de inyección y las salidas de aire del molde, la presión de inyección, la fuerza neta de cierre y el diseño óptimo de los circuitos de enfriamiento necesarios para controlar la temperatura de curado dentro del molde²³.

No solo los parámetros de proceso y el diseño del molde juegan un papel importante en el comportamiento del frente de flujo, el tipo de refuerzo o presentación de la fibra también afectan este fenómeno. Como lo ha referenciado Tan hua et al²³, existe una caída de presión detrás del frente de flujo en algunos tipos de refuerzo, que afectan la ubicación del mismo en el molde.

A pesar de que la técnica de RTM no es reciente y ha sido ampliamente estudiada a nivel mundial, el proceso de inyección aun sigue siendo tema reciente de

²³ Hua, T. Variations in unsaturated flow with flow direction in resin transfer molding: An experimental investigation. Composites parte A. 2007. vol. 38. P 1872-1892.

investigación^{24 25}, no solo por la aparición de nuevos refuerzos, matrices, aditivos o núcleos que plantean nuevas condiciones de procesamiento específicas y diferentes repercusiones en las propiedades finales, si no que adicionalmente aun falta clarificar o estudiar otros temas que no están completamente solucionados: como por ejemplo la disparidad aun existente entre las simulaciones por CFD del llenados de molde y la realidad a pesar de utilizar software especializados, y su relación con la utilización de valores de permeabilidad de los refuerzos obtenidos en condiciones ideales de laboratorio o el análisis de la fabricación y el llenado del molde para arquitecturas complejas como los son los plásticos reforzados tipo sándwich. En los capítulos a continuación pretende proporcionar más argumentos para la búsqueda de la solución de dichos temas.

²⁴ Palardy, G. Optimization of RTM processing parameters for Class A surface finish. *Composites: Part B* 39 (2008). P 1280–1286.

²⁵ Nieri, P. Cost-effective high-performance solutions for automotive body panels. *JEC composites magazine*. N° 45. Noviembre-diciembre 2008.

5 MEDICIÓN DE PERMEABILIDAD

En este capítulo se describen los diferentes aspectos relacionados con la medición de la permeabilidad en diferentes refuerzos o tejidos de fibra de vidrio generalmente utilizados en la fabricación de laminados de poliéster reforzado, abarcando una revisión del estado del arte, procedimientos experimentales utilizados, y los resultados obtenidos. También como aspecto complementario, se describirán modelaciones por computador de los experimentos realizados, utilizando programas comerciales de CFD (dinámica de fluidos computacional), con el fin de establecer la confiabilidad del procedimiento experimental realizado para la medición de la permeabilidad.

5.1 ESTADO DEL ARTE DE PERMEABILIDAD

La permeabilidad a nivel general puede definirse como la medida de la capacidad de un medio poroso a ser atravesado por un fluido²⁶. Es decir, que un medio poroso que permita un rápido flujo de un fluido a través de él, se dice que presenta una alta permeabilidad. El flujo de líquidos y gases en medios porosos es un tópico ampliamente investigado debido a que este fenómeno tiene una gran cantidad de aplicaciones en la ciencia y en la industria^{27 28 29 30 31}, como es el caso del estudio de un fenómeno industrial como es el paso agua caliente a través de una capa de café molido dentro una cafetera, para obtener un café expreso³², hasta problemas de ingeniería

²⁶ Werner, C. Double-diffusive fingering in porous media. The Florida State University (2007).

²⁷ Scheidegger, A. The physics of flow through porous media. University of Toronto; 1974.

²⁸ Kaviany, M. Principles of heat transfer in porous media. Springer; 1995.

²⁹ Allan, F; Kamel, M; Mughrabi, T and Hamdan, M. Infiltration of oil into porous sediments, Appl. Math. Comput. 177 (2) (2006). P 659–664.

³⁰ Sadegh Zadeh, K. Multi-scale Inverse Modeling in Biological Mass Transport Processes, Ph.D. Thesis, Fischell Department of Bioengineering, University of Maryland at College Park, 2006.

³¹ Sadegh Zadeh, K. Parameter estimation in flow through partially saturated porous materials, J. Comput. Phys. 227 (24) (2008). P 10243–10262.

³² Navarini, L; Nobile, E; Pinto, F; Scheri, A and Suggi-Liveran, F. Experimental Investigation of Steam Pressure Coffee Extraction in a Stove-top Coffee Maker. Applied Thermal Engineering (2008).

más complejos como el modelamiento del flujo de gases de escape en motores diesel a través de filtros de partículas que ayudan a reducir las emisiones contaminantes³³.

En el caso particular del procesamiento de materiales compuestos de matriz polimérica este fenómeno tiene gran importancia, ya que algunas técnicas de manufactura para este tipo de materiales parten de tener el refuerzo de manera seca dentro de un molde para luego ser infiltradas por la resina líquida, como las técnicas de infusión, moldeo por transferencia de resina (RTM) y el moldeo estructural por inyección de resina (SRIM). La determinación de los valores de permeabilidad en telas o refuerzos utilizados en RTM permite establecer el comportamiento del flujo de resina en moldes, especialmente importante en la fabricación de piezas de gran tamaño y complejidad.

Para lograr óptimas propiedades mecánicas y buen acabado en piezas fabricadas por RTM, es indispensable garantizar un completo llenado del molde y una adecuada impregnación de la fibra, que solo es posible a través de un molde correctamente diseñado, para lo cual es indispensable el entendimiento de variables como la presión de inyección, tasa de flujo de inyección, ubicación del lugar o lugares de inyección y los sitios de salida y temperaturas del molde y de la resina³. Estableciendo características del proceso como la permeabilidad y el patrón del flujo, que incorporados a una herramienta adecuada de simulación numérica por elementos finitos permitirá una buena aproximación al molde ideal, de lo contrario sería necesario fabricar el molde mediante ensayo y error, con el costo en tiempo y materiales que esto implica.

Existen básicamente dos métodos experimentales utilizados para la caracterización de flujo de fluidos viscosos a través de reforzantes utilizados en la fabricación de materiales compuestos: *a)* el método de flujo unidireccional (fig 9a) y *b)* el método de flujo radial (fig 9b)^{12 34 35 36}. El experimento de flujo unidireccional o rectilíneo es llevado a cabo generalmente por medio de un molde rectangular fabricado en acero o aluminio que posee una tapa polimérica transparente de PMMA (acrílico), para poder visualizar el frente de flujo. El refuerzo o tela a ensayar es colocado dentro del molde,

³³ Shende, A; Johnson, J; Yang, S; Bagley, S and Thalagavara, A. The filtration and particulate matter oxidation characteristics of a catalyzed wall-flow diesel particulate filter : Experimental and 1-D 2-layer model results. SAE transactions. 2005, vol. 114, no 4. P 1878.

³⁴ Weitzenbock, J; Sheno, and Wilson, P. "Radial flow permeability measurement. Part A: Theory" Composites: Part A. vol 30 (1999), P 781–796.

³⁵ Lekakou, C; Johari, M; Norman, D and Bader, M. Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding. Composites: Part A. vol 27A (1996), P 401-408.

³⁶ Han, K; Lee, C and Rice, B. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. Composites Science and Technology 60 (2000). P 2435-2441.

y por uno de sus extremos se realiza la inyección de la resina, como se muestra esquemáticamente en la figura 9a, en donde el punto rojo hace referencia al puerto de inyección. Este método presenta la desventaja de que solo puede medir la permeabilidad en el sentido del flujo, y para refuerzos anisotrópicos se requieren múltiples ensayos para obtener los valores de permeabilidad en las diferentes direcciones. También, otro de los problemas que se presentan en este método es el conocido como efecto de borde (en inglés “Edge effects”), que consiste en un pequeño espacio que se genera en el borde del molde y el refuerzo, que hace que el flujo valla con mayor velocidad por esos sitios, provocando una pérdida de precisión en la mediciones¹².

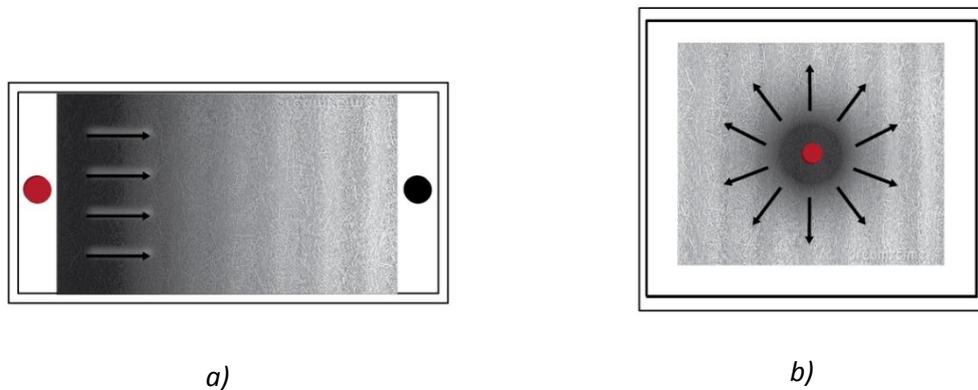


Figura 9. Representación grafica de los dos métodos utilizados para la medición de la permeabilidad en refuerzos utilizados para RTM. *a)* Método unidireccional y *b)* Método radial.

Por otro lado, el experimento radial surgió a partir de la necesidad de obtener los diferentes valores de la permeabilidad en el plano en un experimento único y rápido, y así reducir el tiempo invertido en la medición de la permeabilidad en refuerzos anisotrópicos y evitar los problemas de “Edge effects” de los ensayos unidireccionales. Este tipo de ensayo ha venido ganando popularidad en su uso por los investigadores^{10 34 35 36 37 38}, aunque con el inconveniente de ser solo aplicable para flujo no saturado en refuerzos anisotrópicos, es decir el refuerzo se debe encontrar seco a la hora de realizar el ensayo. En la realización de este ensayo para materiales de refuerzo isotrópicos se puede observar un frente de flujo circular, mientras que para los

³⁷ Chiu, C. H. In-Plane Permeability of Stitched MMWK Laminates in Resin TransferMolding. 391 Journal of Reinforced Plastics and Composites(2002) 21; P 391

³⁸ Cho, Y; Song, Y; Kang, T, Chung, K and Youn, J. “Permeability Measurement of a Circular Braided Preform for Resin Transfer Molding”;Fibers and Polymers, Vol.4 (2003), P 135-144.

anisotrópicos el frente del flujo llega a ser elíptico. Al igual que en el ensayo unidireccional, se requiere la utilización de un molde, en donde la inyección de fluido se realiza de manera central, como se muestra en la figura 9b. En este método también es necesaria la construcción de un molde para la medición. Algunas de las consideraciones en la fabricación serán discutidas en la sección 4.2.2.

Los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos son expresados en unidades de área, y generalmente en metros cuadrados (m^2). Los valores típicos pueden variar dramáticamente entre tipos de materiales y direcciones, desde órdenes de magnitud altos, cercanos a $1 \times 10^{-9} m^2$ en refuerzos discontinuos con baja fracción de fibra (v_f) como los tipo mat, hasta altos valores del orden de $1 \times 10^{-11} m^2$ en reforzamientos con altos v_f en tejidos unidireccionales en sentido transversal⁸.

El tema de medición de la permeabilidad sobre diferentes refuerzos ha sido ampliamente estudiado^{8 12 35 36 37 38 39 40} Por ejemplo Cho et al.³⁸ analizaron la permeabilidad de varios refuerzos o preformas medidas bajo condiciones de flujos saturados y no saturados, concluyendo que las medidas son afectadas por la capilaridad, y encontrando que los valores de permeabilidad en condiciones no saturadas para los diferentes refuerzos tipo mat son de un 3% a 40% más altas que para las saturadas, por lo que recomiendan medir en la condición no saturada los refuerzos o preformas que estarán involucrados en un proceso de fabricación por RTM, especialmente los que se fabrican a baja presión, que son los más afectados por la capilaridad.

Por otro lado, los métodos de medición sobre diferentes refuerzos involucran la utilización de algún tipo de fluido, comúnmente algún tipo de aceite o resina, que conlleva a un ensayo relativamente lento y a un tedioso proceso de limpieza posterior. Estudios como los de Pomeroy et al.⁴¹ y Ding et al.⁴² utilizaron un flujo de aire para atravesar la preforma, lográndose cierto grado de precisión. Aun así, existían problemas relacionados con el uso de un fluido compresible para la medición, la

³⁹ Hoes, K; Dinescu, D; Sol, H; Vanheule, M; Parnas, R; Luo, Y and Verpoest, I. New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM. *Composites science and technology*. Vol 60 (2000), P 2435-2441.

⁴⁰ Golestanian, H. Experimental determination of preform permeability variation with porosity for woven fiberglass and carbon mats. 13th International Conference on Experimental Mechanics. July 1 2007.

⁴¹ Pomeroy, R; Grove, S; Summerscales, J; Wang, Y and Harper, A. Preform Characterisation for Resin Transfer Moulding"; *Composites Processing Association Limited*. April 2006.

⁴² Ding, L; Shih, C; Liang, Z; Zhang, C and Wang, B. In situ measurement and monitoring of whole-field permeability profile of fiber preform for liquid composite molding processes; *Composites: Part A*, Vol 34 (2003), P 779–789.

dificultad para obtener un flujo laminar y variaciones en el flujo. Sin embargo, la utilización de algún tipo de gas o líquido diferente a la resina utilizada para la fabricación real no tiene en cuenta factores como la solubilidad y la tasa a la cual el apresto se disuelve a medida que la resina impregna la fibra, lo que podría ocasionar un arrastre y apilamiento de la fibra (conocido como “fiber wash”)⁴³, creando zonas de mayor y menor permeabilidad.

Muchas de las técnicas que se emplean para establecer el valor de la permeabilidad hacen necesario monitorear visualmente el progreso del fluido al impregnar el refuerzo o tela (avance del frente de flujo), lo cual en algunas ocasiones se torna complejo ya que es común que los fluidos utilizados sean incoloros y traslucidos, produciendo poco contraste con los refuerzos analizados, mas aun si son fibras de vidrio. Para evitar estos inconvenientes algunos investigadores suelen tinturar estos fluidos, como el caso de Lekakou et al.³⁵ que mezcló un tinte negro Sudan disuelto en xileno con aceite siliconado para mejorar el contraste de sus experimentos sobre telas tejidas en fibra de vidrio.

Otro aspecto importante al realizar mediciones de permeabilidad es verificar la coherencia de los resultados obtenidos, en especial cuando se proponen nuevas técnicas de medición y se analizan estos valores en nuevos refuerzos. Existen dos alternativas o vías diferentes para evaluar los resultados obtenidos, la primera alternativa consiste en comparar los valores obtenidos con los reportados en libros especializados o en artículos científicos, determinando rápidamente el grado de coherencia de los resultados, pero en algunos casos no es posible tal procedimiento para refuerzos con arquitecturas y/o fibras especiales, ya que no se encuentran reportados en la literatura. La segunda alternativa para establecer la coherencia de valores experimentales y que es utilizada por de Hoes et al.³⁹ para la validación de un nuevo equipo de medición, es por medio de la utilización de un software especializado para la simulación de los procesos de moldeo líquido de materiales compuestos y que presenta un alto grado de precisión en este tipo de fenómenos, llamado LCM-flot (actualmente PAM-RTM), en el cual se introducen los valores de permeabilidad obtenidos experimentalmente con el fin de simular el llenado, y así sus respectivos tiempos de llenado, que luego son comparados con los reales del experimento. El diagrama de flujo de dicho procedimiento se muestra en la figura 10.

⁴³ Hayward, J and Harris, B. “Effect of process variables on the quality of RTM mouldings”; *Sampe Journal*, Vol 26 (1990), P 39-46.

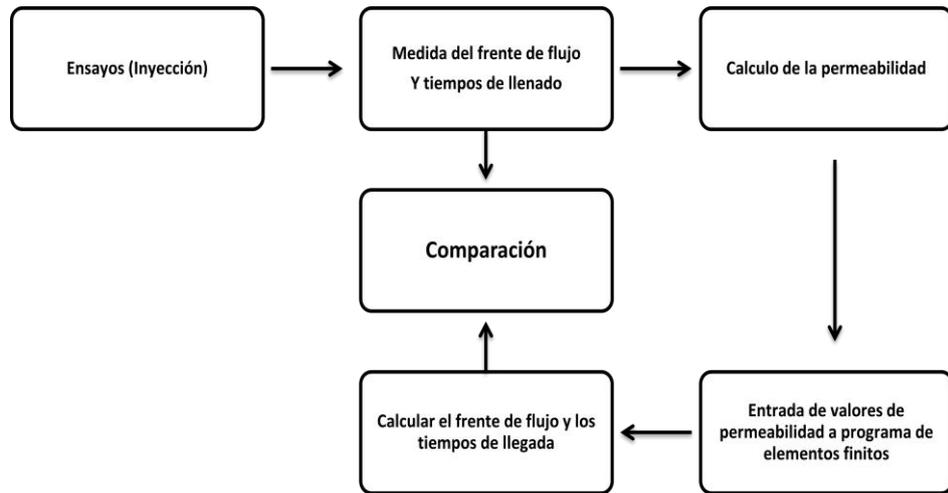


Figura 10. Diagrama de flujo utilizado para la validación de un nuevo procedimiento para la medición de la permeabilidad³⁹.

Cálculo de la permeabilidad

Generalmente el punto de partida para la determinación de los valores de permeabilidad en telas o refuerzos utilizados en RTM es mediante la utilización de la *ley de Darcy*, que originalmente fue desarrollada como una herramienta para la industria del petróleo evaluando el flujo del mismo a través de rocas⁸. Esta ley dice que el vector de velocidad de Darcy $\langle v \rangle$ esta dado por⁴⁴:

$$\langle v \rangle = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (1)$$

donde k es la Permeabilidad, μ es la viscosidad newtoniana del fluido y $\frac{\partial P}{\partial x}$ es el gradiente de presión en la dirección del fluido.

Esta relación lineal entre el promedio de velocidad (impregnación) y el gradiente de presión, solo se reconoce que es válida cuando el gradiente de presión o velocidad de

⁴⁴ Nield, D and Bejan, A. *Convection in porous media*. Springer. 2006. P 6.

flujo es pequeño⁴⁵. Mediante la modelación de esta ecuación es posible predecir la forma y la posición del frente de flujo en todo momento con cierta precisión, incluso si no se conoce la geometría de los poros [12].

Existe otra ecuación utilizada para la medición de la permeabilidad, y que tiene en cuenta la naturaleza del refuerzo, es la ecuación de *Kozeny-Carman*, esta establece que la permeabilidad está dada por [12]:

$$k = \frac{Cd^2\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}, \quad (2)$$

donde C es una constante relacionada con la geometría de los canales individuales del medio poroso, d es el diámetro de la fibra y ε es la porosidad. Este último término es relativamente fácil de calcular en telas o mantas de refuerzo si se conoce su fracción volumétrica (V_f), ya que la porosidad es la fracción del volumen vacío de la misma ($1 - V_f$). La ecuación *Kozeny-Carman* fue inicialmente desarrollada para medios porosos particulados e isotrópicos y no trabajaba bien para refuerzos anisotrópicos utilizados en moldeo de materiales compuestos¹², debido a que la geometría de los canales en estos refuerzos es compleja y difícil de incorporar en la ecuación. Si se tiene en cuenta que esta ecuación contiene el término del diámetro de la fibra, y es sabido que la mayor parte del flujo es usualmente dominado por el flujo entre las mechas (manojos) de fibras en lugar que entre las fibras, es necesario entonces realizar modificaciones a este modelo para cada una de las telas tejidas analizadas, si se quiere tener una mayor precisión⁸.

Posterior al modelo *Kozeny-Carman* inicial se han desarrollado otras variaciones de la ecuación para describir la permeabilidad en refuerzos específicos^{12 36 46}, como tejidos unidireccionales, discontinuos u otros, y han podido describir el fenómeno con una relativa precisión, pero si se tiene en cuenta la gran cantidad de refuerzos existentes y los que pueden ser creados en el mundo de los materiales compuestos, la necesidad de tener una variación de la geometría de los poros para cada uno de esos refuerzos, resulta dispendioso la utilización de este modelo, ya que se tendría que reescribir el modelo para cada situación.

⁴⁵ Chai, Z; Shi, B; Lu, J and Guo, Z. Non-Darcy flow in disordered porous media: A lattice Boltzmann study. *Computers & Fluids*. 39 (2010). P 2069–2077.

⁴⁶ Schell, J; Siegrist, M and Ermanni, P. Experimental Determination of the Transversal and Longitudinal Fibre Bundle Permeability. *Appl Compos Mater* (2007). 14. P 117–128.

En este proyecto se utilizó la ecuación de *Darcy* (1) para la determinación de los valores de permeabilidad para diferentes refuerzos estudiados, debido a la facilidad de medición y al nivel de precisión aceptable en los estudios realizados^{12 34-42}. A continuación se describe el cálculo específico de la permeabilidad para el método de flujo radial utilizado en este estudio.

Para la determinación de la permeabilidad y la porosidad en el método radial se debe reescribir la ecuación de *Darcy* (1). Para el flujo radial, que se obtiene solucionando la ecuación de Laplace en coordenadas polares, dando como resultado³⁸:

$$v_r = - \frac{k_{rr} \partial P}{\mu \partial r} , \quad (3)$$

donde v_r es la velocidad radial del fluido.

Debido a que tiene que ser resuelto el gradiente de presión dentro del molde en función de la posición del frente del flujo, se sustituye la nueva distribución de presión en (3) e integrando usando las condiciones de frontera de $\varepsilon(dr_f/dt) = v$ en el frente del flujo y $r_f = r_0$ en $t = 0$, la permeabilidad se obtiene como³⁸:

$$k = \left\{ r_f^2 \left[2 \ln \left(\frac{r_f}{r_0} \right) - 1 \right] + r_0^2 \right\} \frac{1}{t} \frac{\mu \varepsilon}{4 \Delta P} , \quad (4)$$

donde ε es la porosidad, μ la viscosidad dinámica del fluido, t el tiempo desde el inicio de la inyección hasta cuando un punto de la cavidad es alcanzado, (r_f) y (r_0) : Radio del frente de flujo y de entrada respectivamente (ver figura 11), y ΔP es la diferencia entre la presión del frente de flujo P_f y la presión de entrada P_0 . Para efecto de abreviación en la redacción en explicaciones posteriores, el coeficiente de esta ecuación $(r_f^2 [2 \ln(\frac{r_f}{r_0}) - 1] + r_0^2)$, lo llamaremos coeficiente A . La permeabilidad queda expresada de la siguiente forma:

$$k = A \frac{1}{t} \frac{\mu \varepsilon}{4 \Delta P} , \quad (5)$$

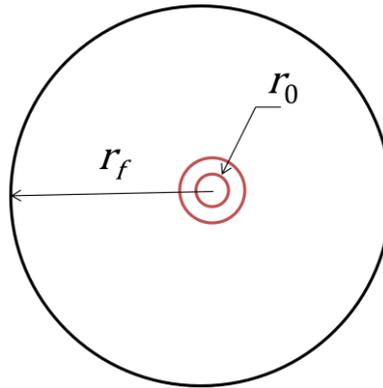


Figura 11. Ilustración de la identificación del radio del frente de flujo y de inyección durante el desarrollo de un ensayo radial.

Como han publicado varios investigadores^{34 38}, al graficar el coeficiente A versus el tiempo para diferentes posiciones del frente de flujo (r_f), manteniendo constante los otros parámetros, se obtienen diferentes puntos. Si se ajustan dichos puntos a una línea de tendencia, la pendiente correspondiente a dicha recta se llama f_{iso} . La permeabilidad es obtenida multiplicando f_{iso} con μ , ε y ΔP .

$$k = f_{iso} \frac{\mu \varepsilon}{4 \Delta P} \cdot \quad (6)$$

Debido a que la permeabilidad depende en gran medida de la porosidad, se debe calcular el valor de esta última, evaluando la fracción volumétrica del refuerzo (V_f) o la preforma. La porosidad (ε) se obtiene como:

$$\varepsilon = 1 - V_f = 1 - \frac{N W_f}{d \rho}, \quad (7)$$

donde N es el número de capas de refuerzo, W_f el peso por unidad de área de la tela, d la altura de la cavidad y ρ la densidad de la fibra.

Luego de obtener los valores de permeabilidad resulta útil realizar la simulación del llenado del molde por medio de alguna herramienta de elementos finitos para obtener parámetros en el diseño del molde y condiciones de procesamiento que permitan obtener piezas con la menor cantidad de defectos posibles, y también estas simulaciones en software de comprobada eficacia ayudan a dar validez a algunos resultados en los cuales no se tenga certeza de su validez o la utilización de nuevos métodos de medición³⁹. A continuación se hace una breve descripción de las bases de

la dinámica de fluidos computacional (CFD) que permitió analizar los datos obtenidos con este estudio.

Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional o simplemente CFD (por sus siglas en inglés), es una rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de obtener soluciones numéricas de problemas de flujo de fluidos mediante una computadora. La llegada de las computadoras de alta velocidad y capacidad de almacenamiento ha permitido que el CFD resuelva muchos de los problemas de flujo, incluso los que sean incompresibles y compresibles, laminares y turbulentos, químicamente reactivos y no reactivos, mono y multifásicos⁴⁷.

Una simulación numérica en CFD está compuesta básicamente por 3 etapas: pre-procesamiento, procesamiento y pos procesamiento. Durante la etapa de pre procesamiento se genera la geometría, el enmallado y configuración de la simulación. Durante la etapa de procesamiento se resuelven numéricamente las ecuaciones fundamentales y la etapa de pos procesamiento está definida por la visualización y análisis de resultados.

Actualmente existen varias empresas que se han dedicado a programar y ofrecer software que resuelven problemas de fluidos usando CFD. Algunos de ellos son: *Ansys CFX*, *OpenFOAM*, *Ansys Fluent*, *Star-CD*, *Flow-3D* y *Phoenix*. La diferencia entre ellos son las capacidades adicionales que tienen, por ejemplo, múltiples modelos de turbulencia, modelos de partículas y contaminantes, componentes rotatorios entre otras; características para resolver problemas muy puntuales⁴⁸.

Uno de los software CFD especializados que ha ganado gran popularidad para la simulación de fenómenos en técnicas de moldeo líquido en materiales compuestos como: el moldeo por transferencia de resina (RTM), RTM asistido por vacío (VARTM), infusión de resina asistida por vacío (VARI), moldeo por compresión por transferencia de resina (C RTM y AC RTM); es el PAM RTM, que fue desarrollado por *ESI group* y permite principalmente evaluar estrategias en la fabricación y optimizar parámetros de

⁴⁷ Potter, M and Wiggert, D. Mecánica de fluidos. Thomson. 3 edición (2001).

⁴⁸ http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf

proceso⁴⁹, y localmente es uno de los programas que mas goza de reconocimiento debido a su buena aproximación de las simulaciones a los fenómenos reales.

Las ventajas de la CFD son la predicción de propiedades del fluido con gran detalle en el dominio estudiado, ayudando al diseño, al prototipaje y generando soluciones rápidas, evitando costosos experimentos se obtiene una visualización y animación del proceso en términos de las variables del fluido. Por el contrario, las desventajas son que requiere usuarios con amplia experiencia y formación especializada, consume recursos de hardware y software que requieren inversiones significativas, en algunos casos, el coste computacional es elevado⁵⁰.

5.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En esta sección se hará una descripción de los refuerzos estudiados, el diseño y construcción de un molde y el procedimiento seguido para la medición de la permeabilidad. También se describirán las variables, programas y el procedimiento empleados para la modelación por computador de los experimentos realizados.

5.2.1 Materiales

Se evaluó la permeabilidad de tres tipos de telas de fibra de vidrio utilizadas como refuerzo en la fabricación de piezas en plástico reforzado:

- i) Tela discontinua no tejida (mat): Manta utilizada en laminación manual, de gramaje o densidad superficial de 450 g/m².
- ii) Tela tejida bidireccional: Manta utilizada para mejorar propiedades de resistencia en laminación manual, conocida por su nombre en ingles como: woven roving, de gramaje de 800 g/m².
- iii) Tela especial para su uso en RTM, conocida como manta moldeable, que consiste de dos capas externas de fibra de vidrio discontinua y un núcleo de fibras no tejidas sintéticas de polietileno de alta porosidad, que provee a la tela un flujo veloz de la resina a través de ella. La densidad superficial de esta manta es de 600 g/m².

⁴⁹ <http://www.esi-group.com/products/composites-plastics/pam-rtm>

⁵⁰ <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4186/1/MEMORIA%20CFD.pdf>

Todas las telas o refuerzos analizados fueron adquiridos con el proveedor local de insumos para fibra de vidrio, Sumiglas S.A.

El fluido utilizado para los ensayos fue una resina de poliéster ortoftálica disuelta en estireno sin catalizar de la empresa local *Glassfort* de la referencia RP 010 con una densidad de 1.13 g/cm^3 y una viscosidad de $0.22 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, medida utilizando un viscosímetro digital LVDV de la marca *Brookfield Engineering*.

La selección de esta resina para la realización de los ensayos fue basada en que esta misma será utilizada para la fabricación de laminados tipo sándwich posteriormente, con lo que los valores de permeabilidad obtenidos serán más representativos, que los obtenidos con el uso de otros tipos de fluidos en ensayos similares como aceite siliconado^{36 38}, jarabe de maíz³⁹, aceite mineral⁵¹, ya que estos fluidos probablemente no presentarían de manera evidente el fenómeno de “fiber wash” mencionado anteriormente. Aunque Amico et al⁵², en su estudio de la permeabilidad en telas tejidas en fibra de vidrio compararon el uso de dos fluidos: el aceite de silicona y la resina epóxica; en sus experimentos encontraron que la permeabilidad en las fibras fue independiente del líquido permeante, sin embargo la utilización de la resina de poliéster insaturado no fue analizado, lo cual es pertinente para ser analizado.

Para poder realizar la medición de permeabilidad de los diferentes refuerzos a estudiar se procedió al diseño y fabricación de un molde instrumentado para tal fin, por lo que a continuación se describen los pasos más importante en su diseño y construcción.

5.2.2 Diseño y fabricación del molde

Se diseño un molde para la determinación de valores de permeabilidad mediante experimentos de flujo radial, teniendo en cuenta consideraciones establecidas por varios autores^{12 37 38 51}. Este método básicamente consiste en obtener un flujo radial sobre la tela a estudiar, mediante la inyección de un fluido en un puerto central entre dos placas paralelas. El diseño general se hizo con base en el molde propuesto en el estudio de Cho et al³⁸, en donde proponían una cuba fabricada en acero, una tapa en acrílico (PMMA) y un marco superior que se sujetaba en la cuba por medio de tornillos. El problema con este molde propuesto es que la operación de apertura y

⁵¹ Wu, X; Li, J and Ajit Sheno, R. Measurement of braided preform permeability. *Composites Science and Technology* (2006). 66: 3064–3069.

⁵² Amico, s and Lekakou, c. an experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding. *composites science and technology* 61 (2001) 1945–1959.

cierre es engorrosa, ya que se utilizaban múltiples tornillos que debían ser apretados y soltados en cada uno de los ensayos. Adicionalmente, la tapa de acrílico debido a su bajo módulo de elasticidad puede deflactarse durante el ensayo, variando la altura de la cavidad y causando errores en la medición, este fenómeno de deflexión en tapas de acrílico ha sido descrito por algunos autores^{37 39}.

Con miras a solucionar dichos problemas se adoptaron algunas soluciones propuestas en el estudio de Chiu et al³⁷, en donde se desarrolló un molde transparente en ambas caras para la medición de la permeabilidad por el método de flujo radial, utilizando laminas de acrílico de 25 mm de espesor, y para aumentar la rigidez del conjunto y disminuir las posibles deformaciones de la cavidad debido a la baja rigidez de este polímero, se incorporaron laminas de vidrio de 9 mm al interior de las placas acrílicas. Para el cierre del molde utilizaron prensas en C para el cierre del mismo, que permiten una operación más rápida en los experimentos.

Este dispositivo se encuentra representado esquemáticamente en la figura 12. La fabricación inició a partir de una placa de acero AISI SAE 1020 rectificada, para obtener una superficie lisa y plana, luego se formó una cuba por medio del traslape de cuatro platinas del mismo material alrededor de la placa. A éstas platinas se les realizaron agujeros roscados para poder permitir la unión firme a la placa plana mediante tornillos, y para garantizar la estanqueidad de la cavidad se adicionó un sellante *loctite* 515 entre las uniones. Una lámina de vidrio y otra de acrílico (PMMA) actuaron como tapa transparente para el molde diseñado, en donde la lámina de vidrio se incorpora para aportar rigidez. Finalmente se realizaron espaciadores en acero en forma de “L” para fijar la altura de la cavidad, que fueron fabricados en acero y cortados por plasma.

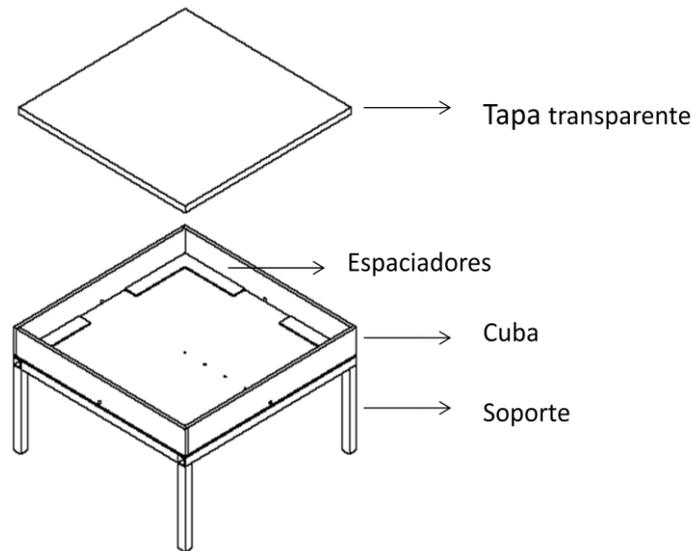


Figura 12. Representación del molde utilizado para la medición de permeabilidad en las diferentes telas de refuerzo.

Teniendo en cuenta que la inyección se realizaría por la parte inferior del molde, se fabricó un soporte para elevar la altura del molde y permitir la fácil ubicación de racores, mangueras y sensores en el mismo. Se taladraron agujeros en el centro y en cada una de las paredes laterales de la cuba, para la entrada del fluido y para la evacuación del aire durante la inyección, respectivamente. El diámetro del agujero central fue de 18 mm y en las paredes laterales de 7 mm. Para mantener el molde cerrado y una altura de la cavidad constante durante la inyección, se ubicaron ocho Prensas en C espaciadas uniformemente, como se muestra en la figura 13. También se fabricaron placas rectangulares de acero recubiertas con neopreno para una mejor distribución de la presión de cada par de prensas, y no afectar así la resistencia de la lámina de acrílico.

La estanqueidad del molde fue probada inicialmente con el llenado de agua, detectándose algunas fugas, que se corrigieron posteriormente con la aplicación de sellador. Luego se realizó una prueba inyectando aceite siliconado a presión por medio de una máquina de RTM de la marca *Magnum Venus Products* de la serie Patriot™ al molde vacío, es decir sin telas (ver figura 13), en donde se comprobó la ausencia de fugas y el buen comportamiento general del molde.

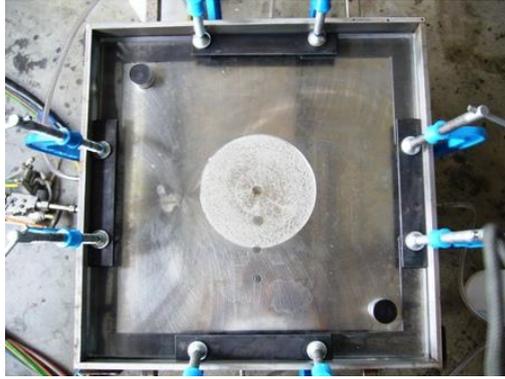


Figura 13. Ubicación de las prensas de cierre del molde durante una inyección en vacío.

5.2.3 Procedimiento

El esquema del montaje empleado para la medición de la permeabilidad en los diferentes refuerzos se muestra en la figura 14. Los elementos principales del montaje son el molde (descrito anteriormente) donde se ubicará el refuerzo a ser medido, una cámara de video digital para registrar la posición del frente de flujo en cada instante de tiempo, un transductor de presión en el puerto de inyección y un equipo para la inyección del fluido dentro del molde, en este caso una máquina de RTM. El primer procedimiento realizado consistió en cortar las telas o refuerzos a ser probados, a dimensiones acordes con el área interna del molde, y perforar un agujero en el centro de la tela del tamaño del orificio de inyección (18 mm). Luego se procede a ubicar los espaciadores en forma de “L” en las esquinas del molde, estableciendo su espesor, y así la altura de la cavidad, de acuerdo al nivel de porosidad que sea deseado para la medición. Posteriormente se procede a ubicarla en el interior del molde y cerrarlo, ubicando las prensas uniformemente distribuidas sobre la tapa transparente.

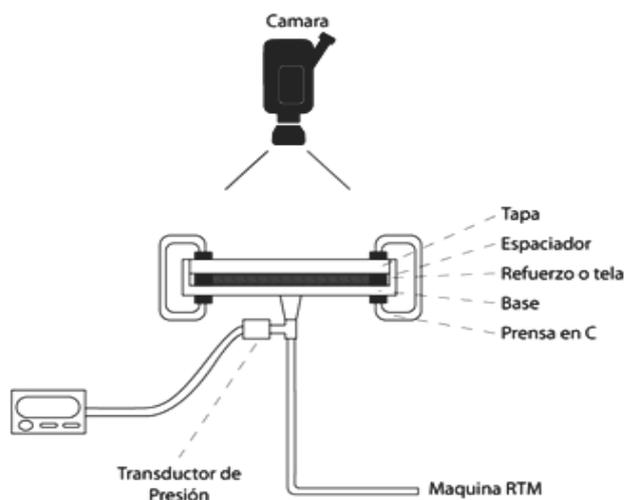


Figura 14. Esquema del proceso utilizado para la medición de la permeabilidad.

Se realizaron los ensayos sobre los tres tipos de telas de fibra de vidrio descritas anteriormente en la sección 4.2.1 a diferentes niveles de porosidad, como se puede observar en la tabla 1, llamaremos la tela especial para uso en RTM como “Mat núcleo”, la tela no tejida discontinua como “Mat” y la tela tejida bidireccional como “Woven” como abreviación. En los refuerzos Mat núcleo y Mat se analizaron 2 niveles de porosidad en cada caso, las cuales se identificaran con números luego de nombre (1 y 2). Normalmente la variación de la altura de la cavidad para obtener diferentes niveles de porosidad sobre una tela se realizó variando el espesor del espaciador, exceptuando el caso de Mat 2, que se disminuyó la porosidad al colocar dos telas sobre la misma altura de la cavidad.

Refuerzos	Altura de la cavidad (mm)	Numero de telas	Porosidad (ϵ)
Mat núcleo 1	3	1	0,94
Mat núcleo 2	1,8	1	0,91
Mat 1	0,9	1	0,84
Mat 2	0,9	2	0,69
Woven 1	0,9	1	0,7

Tabla 1. Configuración de los refuerzos utilizados en el molde.

Para inyectar la resina dentro del molde se utilizó la maquina RTM de la marca *Magnum Venus Products* descrita anteriormente. La utilización de la misma para las pruebas está relacionada con hacer las medidas lo más cercanas posibles a la realidad, debido a que todos los estudios previos analizados utilizaron para sus pruebas condiciones de laboratorio ideales, con sistemas de flujo muy precisos y constantes, que en pocas ocasiones ocurre en un proceso de RTM real. Como el caso de Cho et al³⁸ que utilizaron un recipiente a presión con nitrógeno con un regulador de presión conectado a un tanque del líquido a inyectar, el cual al suministrarle la presión del nitrógeno generaba un flujo constante del líquido hacia el molde de medición. Otros investigadores^{36 37} utilizaron para sus ensayos un recipiente cilíndrico con pistón, el cual era accionado con una máquina universal de ensayos, estableciendo una velocidad de flujo constante.

Antes de la conexión de la pistola de la máquina de RTM al molde se realizó una derivación por medio de un conector en T para ubicar un sensor de presión y así registrar los datos de presión para cada experimento. Los datos fueron registrados por un sensor con rango de 0 a 413 kPa (0-60 psi) que fue conectado con un multímetro que registraba mili Amperios, esos valores posteriormente fueron convertidos a unidades de presión. Para establecer la velocidad de avance del frente de flujo, se realizaron marcas sobre la superficie del acrílico y por medio de la filmación del ensayo, utilizando una cámara de video *Sony Handycam* con un disco duro interno y un trípode se determinó la velocidad del frente de flujo. Las grabaciones obtenidas fueron llevadas a un computador para ser analizadas en un editor de video y calcular los diferentes tiempos hasta alcanzar distancias establecidas al punto de inyección. En la figura 15 se muestra una fotografía del montaje real del experimento.

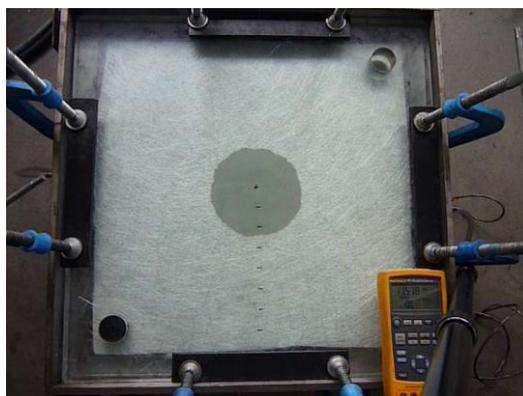


Figura 15. Montaje real del proceso utilizado para la medición de la permeabilidad.

Se realizaron múltiples ensayos para cada refuerzo y configuración analizada, una cantidad mínima de tres ensayos, pero debido a la tendencia a distorsionarse la circunferencia en los frentes de flujo en muchos de los ensayos, que al momento de calcular el valor de permeabilidad se obtenían valores poco coherentes, se decidió entonces optar por calcular la permeabilidad en los ensayos donde se presentara la menor distorsión de la circunferencia.

Previo a la realización de los ensayos sobre los refuerzos de interés, se deben establecer condiciones de inyección que garanticen un flujo uniforme, es decir con la menor cantidad de burbujas. Teniendo en cuenta que durante ensayos preliminares en vacío se detectó una gran cantidad de burbujas durante el inicio de la inyección (ver figura 16a), se realizaron múltiples ensayos para tratar de disminuir este fenómeno, y se llegó a que, la mejor forma de disminuir el porcentaje de burbujas era recurrir a realizar purgas previas antes de iniciar la inyección y adicionalmente descargar la válvula de filtro de la bomba de resina. Una de las posibles razones por la cual se presenta esta alta formación de burbujas es debido a que al cargar inicialmente la máquina con la resina, la bomba trabaja en vacío (sin resina), atrapando aire en los conductos, que puede ser fácilmente evacuado posteriormente, utilizando procedimientos de purga de aire descritos en manuales de usuario o consultas a expertos en el manejo de estos equipos. En la figura 16 b) se muestra la disminución de burbujas durante la inyección luego de las soluciones propuestas.



Figura 16. a) Alta formación de burbujas durante la inyección. b) Disminución de burbujas por ajustes en la máquina de RTM

Adicionalmente se procedió a suprimir el mezclador por turbulencia presente en la pistola de inyección de la máquina de RTM para disminuir la formación de burbujas,

que en inyecciones normales (de resina catalizada), este elemento es el encargado de ayudar a homogenizar el catalizador con la resina, pero para nuestro caso no tendría una influencia positiva, solo la posible generación de burbujas en el desarrollo del experimento.

5.2.4 Modelación

Los resultados de los ensayos de permeabilidad obtenidos fueron analizados mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD), utilizando para ello dos software comerciales: *ANSYS CFX 2.1* y *FLOW-3D* versión 9.4.2. Los valores de permeabilidad fueron introducidos en cada uno de los programas para calcular los tiempos de llenado que luego fueron comparados con los experimentales. Inicialmente se generó la modelación geométrica CAD con todas las dimensiones del molde utilizado para la medición de la permeabilidad. Luego se procedió a la construcción de la malla en ambos programas, por medio de la utilización de elementos tetraédricos. En la figura 17 se muestra el enmallado utilizado en *FLOW-3D*.



Figura 17. Enmallado del molde utilizado para la medición de permeabilidad en *FLOW-3D*.

Luego se suministraron a cada uno de los programas los datos de entrada del fluido como densidad, viscosidad y otros parámetros del proceso como permeabilidad del refuerzo y la presión de entrada. Las simulaciones se realizaron hasta alcanzar un máximo de 100 iteraciones o cuando el error residual fuera menor a 1×10^{-6} para el caso de *Ansys*, y en *FLOW-3D* el criterio de parada fue el tiempo de llenado hasta alcanzar una distancia de 0.18 m.

5.3 RESULTADOS DE PERMEABILIDAD

Para el cálculo de la permeabilidad se debe establecer la posición del frente de flujo en diferentes instantes de tiempo para cada experimento. En la tabla 2 se muestra la posición del frente de flujo para la tela Mat núcleo 1. Con esos datos se procede a calcular el coeficiente A de la ecuación (4) para cada instante de tiempo correspondiente a los segundos que le toma el frente de flujo llegar a las posiciones ubicadas a 6, 12, 18 y 21 cm.

Tiempo (s)	r_f (m)	r_0 (m)	$R_f^2 [2\ln(R_f/R_0) - 1] + R_0^2$
2	0,06	0,018	0,01
6	0,12	0,018	0,04
11	0,18	0,018	0,12
15	0,21	0,018	0,17

Tabla 2. Datos experimentales de la posición del frente de flujo y el tiempo para la tela Mat núcleo 1.

Los valores del coeficiente A obtenidos se grafican versus el tiempo como se aprecia en la figura 18.

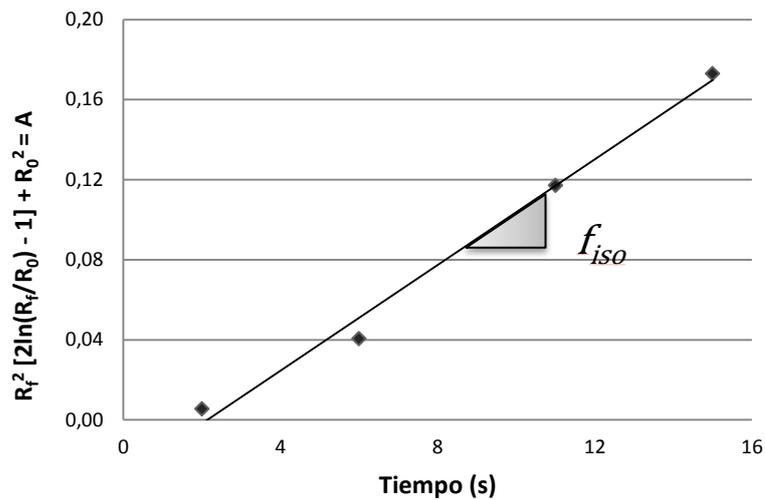


Figura 18. Recta de ajuste para encontrar f_{iso} de la tela Mat núcleo 1.

Luego, en el gráfico se establece la pendiente de la recta de ajuste, que corresponde a f_{iso} , que es remplazado en la ecuación (4), obteniéndose así el valor de permeabilidad. Este procedimiento se repite para cada uno de los refuerzos y configuraciones estudiados.

Los valores experimentales obtenidos de permeabilidad de los refuerzos analizados a diferentes niveles de porosidad se muestran en la figura 19. Al analizar de manera general los resultados se observa una tendencia a aumentar la permeabilidad a medida que aumenta la porosidad en todos los casos, como en principio podría esperarse, ya que a menor porosidad se da una mayor restricción del flujo cuando atraviesa el refuerzo y por ende una menor permeabilidad.

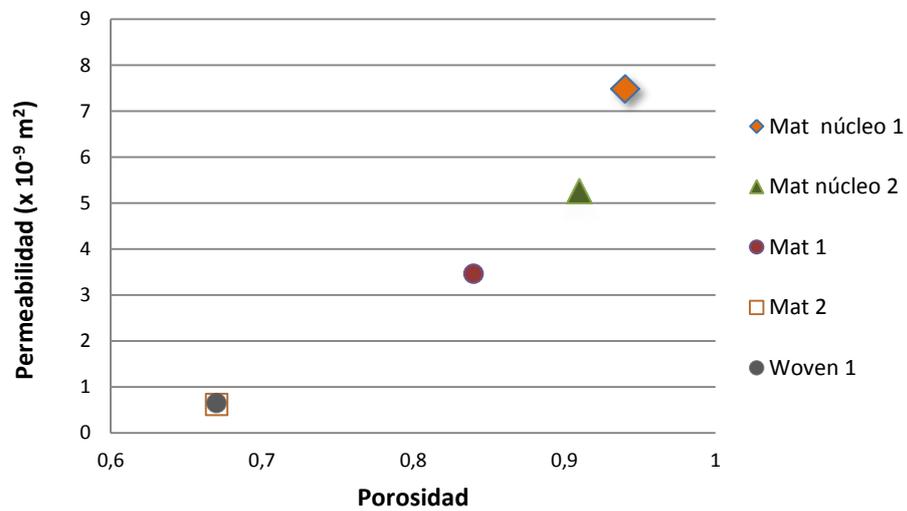


Figura 19. Valores de permeabilidad experimentales de los refuerzos analizados a diferentes niveles de porosidad.

Al analizar detenidamente el incremento de los valores de permeabilidad en la gráfica se observa una tendencia exponencial, por lo que se podría ajustar este comportamiento a una línea de tendencia y establecer su respectiva ecuación, para luego poder calcular valores intermedios de permeabilidad a cualquier nivel de porosidad; al utilizar este procedimiento es posible que se obtengan valores erróneos, ya que estos valores corresponden a refuerzos diferentes, y varios autores han reportado que el tipo y orientación de fibra afectan las medidas de permeabilidad^{35 36}
^{40 51}, y para la obtención de resultados más acertados a partir de este procedimiento habría que obtener varios puntos en esta gráfica de un mismo refuerzo.

Algunos de los valores de permeabilidad encontrados experimentalmente difieren ligeramente de los publicados por algunos autores que han utilizado para sus mediciones fluidos diferentes a la resina de poliéster, como es el caso de Cho et al.³⁸, que a través de ensayos radiales sobre mat de fibra de vidrio y utilizando aceite siliconado obtuvieron valores de permeabilidad ligeramente inferiores (ver tabla 4) a nivel de porosidad equivalente que los obtenidos sobre ese mismo tipo de refuerzo utilizando resina de poliéster, lo que confirma que las mediciones de permeabilidad sobre telas de fibra de vidrio están afectada por el liquido de impregnación utilizados en los ensayos de medición de la permeabilidad.

Refuerzo	k Experimental (m^2)	k Reportados (m^2)
Mat	$3,46 \times 10^{-9}$ ($\varepsilon = 0,8$)	$3,0 \times 10^{-9}$ ($\varepsilon = 0,8$)
Woven	$0,65 \times 10^{-9}$ ($\varepsilon = 0,6$)	$1,8 \times 10^{-9}$ ($\varepsilon = 0,6$)

Tabla 4. Comparación de datos experimentales frente a datos reportados por otros autores.

El caso de medidas de permeabilidad a diferentes niveles de porosidad para telas tejidas de fibra de vidrio ha sido analizado por otros investigadores, por ejemplo Lekakou et al.³⁵ obtuvo un valor de permeabilidad de $1,8 \times 10^{-9} m^2$ sobre tela tejida de fibra de vidrio utilizando un aceite siliconado, en comparación con un valor bajo de permeabilidad encontrado en este experimento en un nivel de porosidad similar, esta apreciable diferencia además de ser atribuida a los tipos de fluidos utilizados para los experimentos, es también probable que esté asociada con la diferencias en los caudales utilizados en los ensayos, ya que Lekakou et al. encontró para esos niveles de porosidad ($\varepsilon = 0,626$) en un tipo de tela tejida, que al duplicar el caudal en un mismo ensayo aumento en tres veces el valor de permeabilidad.

Otro aspecto que pudo haber influenciado la diferencia entre valores encontrados en Woven 1 con respecto a los reportados por Lekakou et al., es el hecho de que este investigador utilizó la relación Kozeny-Carman para el cálculo de la permeabilidad a diferencia de los cálculos basados en Ley de Darcy para este estudio. Varios investigadores^{53 54 55} han encontrado que existen desviaciones en las mediciones de permeabilidad para telas tejidas en la que se utiliza la ley de Darcy, y en el caso particular de Ahn et al.⁵⁶ se sugiere que la relación Kozeny-Carman describe de manera adecuada la permeabilidad durante impregnación de refuerzo en telas tejidas o preformas hasta valores de porosidad de 0,5.

En la tabla 3 se puede observar el comportamiento de la presión de entrada (en el puerto de inyección) para los diferentes refuerzos, presentandose cierta variabilidad en esta medida para las telas, aunque en general se notó que la presión disminuye al aumentar la porosidad. Pero en el caso de Woven 1 se presentó un valor bajo de presión, a pesar de tener una baja porosidad. Este fenómeno es posible que este influenciado por la arquitectura del refuerzo, en donde el flujo básicamente avanza entre mechas (manojos) de fibras en lugar de hacerlo entre las fibras⁸, y es precisamente este refuerzo el que presenta los canales de mayor tamaño debido a su arquitectura tejida con mechas gruesas.

Por otro lado, se nota un aumento excesivo en el valor de presión obtenido en los ensayos para Mat 2 comparado con Mat 1 a pesar de presentar la misma arquitectura, que podría estar denotando la aparición de otros fenómenos durante la medición. Se han reportado fenómenos de arrastre de fibras (“fiber wash”)⁴³ por una rápida disolución del apresto, que facilita el movimiento de las fibras, creando zonas de alta restricción que conlleva a un aumento en la presión, esto facilitado por un alto contenido de estireno de la resina de poliéster utilizada para la impregnación

⁵³ Visconti, I; Langella, A and Durante, M. The influence of injection pressure on the permeability of unidirectional fibre preforms in RTM. In: 8th European Conference on Composite Materials, ECCM-8, 3–6 June 1998, Naples, Italy. p. 737–43.

⁵⁴ Gauvin, R; Trochu, F; Lemenn, Y and Diallo, L. Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement. *Polymer Composites* 1996;17(1):34–42.

⁵⁵ Griffin, P; Grove, S; Russell, P; Short, D; Summerscales, J; Guild, F and Taylor, E. The effect of reinforcement architecture on the long-range flow in fibrous reinforcement. *Composites Manufacturing* 1995;6(3-4):221–35.

⁵⁶ Ahn, K; Seferis, J and Berg, J. Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements. *Polymer Composites*. (12) 1991. 146–152

propiciaría la disolución. El valor obtenido experimentalmente de permeabilidad para Mat 2 es diferente el valor reportado por Comas-Cardona et al.⁵⁷, en donde obtuvieron un valor de permeabilidad de $0,1 \times 10^{-9} \text{m}^2$ a $0,15 \times 10^{-9} \text{m}^2$ para una porosidad (0,515 – 0,534), comparado con un valor de $0,62 \times 10^{-9} \text{m}^2$ a una porosidad de 0,67 obtenidos en este estudio, esta apreciable diferencia es factible que este influenciada por los fenómenos de arrastre de fibras mencionada anteriormente.

Refuerzos	Permeabilidad ($\times 10^{-9} \text{m}^2$)	Porosidad	Presión (kPa)
Mat núcleo 1	7,50	0,94	53,77
Mat núcleo 2	5,27	0,91	75,84
Mat 1	3,46	0,84	87,98
Mat 2	0,62	0,67	207,60
Woven 1	0,65	0,67	48,1

Tabla 3. Valores de permeabilidad, porosidad y presión de inyección de los refuerzos analizados.

Otro aspecto presente en los ensayos de permeabilidad está relacionado con la obtención de geometrías no completamente circulares y bordes irregulares en los frentes de flujo de los refuerzos analizados. En los ensayos sobre las telas Mat núcleo, los frentes de flujo presentaron una forma bastante circular hasta casi alcanzar los extremos del molde, pero con cierta irregularidad en los bordes, como se puede apreciar en la figura 20a. Este comportamiento fue repetitivo para todos los ensayos sin importar la porosidad. Este buen comportamiento sugiere que la permeabilidad es constante sobre todo el refuerzo, y es propiciado por la arquitectura especial del

⁵⁷ Comas-Cardona, S; Zhang, F; Bickerton, S; Tournier, L; Gan, J and Binetruy, C. Fiber reinforcements: correlating permeability and local spatial fibrous features. 18th international conference on composite materials.

refuerzo, el cual posee un “canal” interior en donde hay poca restricción (alta porosidad), y adicionalmente beneficiados por bajos niveles de porosidad utilizados para este tipo de refuerzos

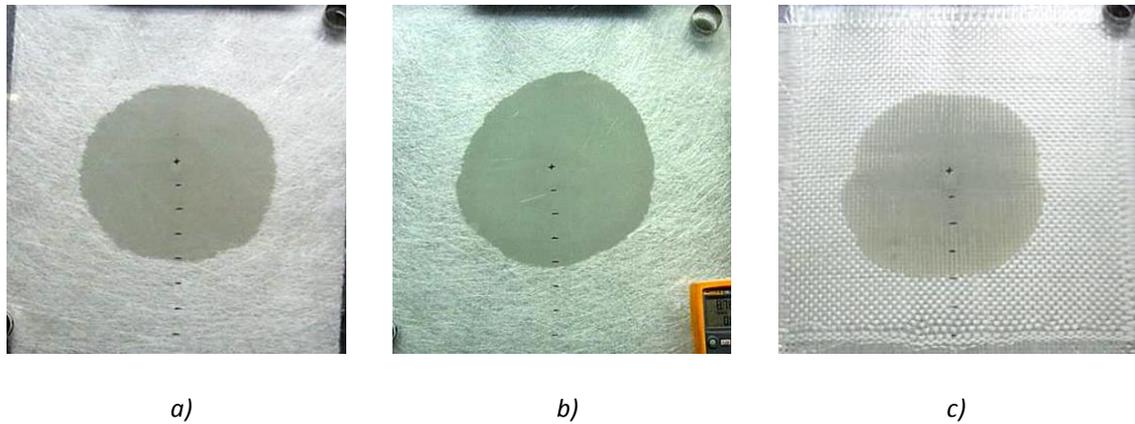


Figura 20. Imagen de la geometría del frente de flujo para los diferentes refuerzos analizados, a) Mat núcleo, b) Mat y c) Woven.

La irregularidad en los bordes del frente de flujo ha sido descrita por Comas-Cardona et al.⁵⁷, quienes en ensayos sobre telas de fibras de vidrio discontinuas (mat) analizaron la influencia de el número de capas sobre la regularidad del frente de flujo en un rango similar de porosidad (0,515 – 0,534), las imágenes de estas pruebas se pueden observar en la figura 21, donde se puede apreciar que al aumentar el número de capas se aumenta la regularidad del frente de flujo. Comas-Cardona et al. atribuyen este fenómeno a que en una sola tela existe una mayor inconsistencia en la distribución de las fibras y que a medida que se aumenta el número de capas se suaviza esa inconsistencia. El comportamiento encontrado por estos investigadores concuerda en parte con los resultados obtenidos experimentalmente en este estudio, ya que en los ensayos realizados en las telas Mat 2 (2 telas) fue más fácil la obtención de geometrías mas uniformes (menos números de ensayos), en comparación con los refuerzos Mat 1 (1 tela) que requirieron un mayor número de ensayos para la obtención de una geometría sin deformaciones excesivas, aunque estos dos refuerzos se analizaron a porosidades diferentes.

En los ensayos realizados en los refuerzos Mat y Woven, los frentes de flujo presentaron geometrías menos circulares (asimétricas) que los refuerzos Mat núcleo (ver figura 20 b y 20c), este fenómeno está influenciado por heterogeneidades e

inconsistencias en la estructura del refuerzo^{57 58}, también diferencias en la compactación de la fibra pudieron haber tenido cierto impacto en la deformación del frente de flujo y en los valores de permeabilidad³⁵, los cuales suelen presentarse habitualmente al momento de manipular la fibra para cortes y ubicación en el molde, y que provocan distorsión en el patrón original de las fibras.

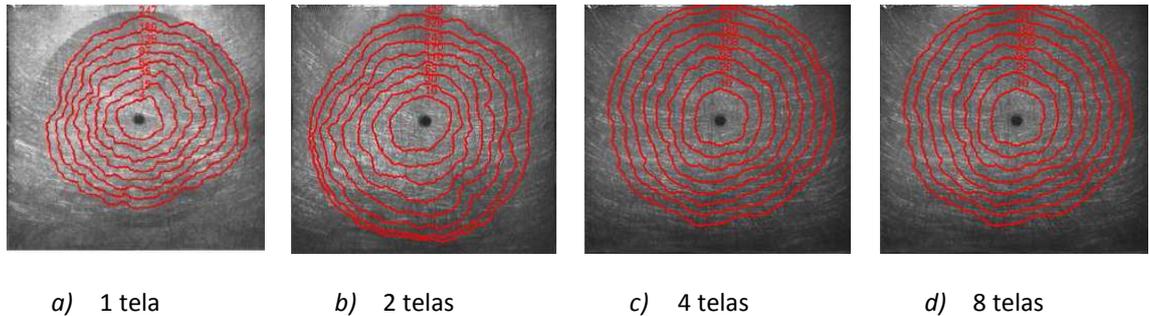


Figura 21. Irregularidades en el frente de flujo sobre telas de fibras discontinuas a diferentes números de capas realizados por S. Comas-Cardona et al., a) 1 tela, b) 2 telas, c) 4 telas y d) 8 telas⁵⁷.

Adicionalmente a los factores ya mencionados que pudieron haber afectado los valores de permeabilidad reportados en este estudio, las distorsiones e irregularidades de los frentes de flujo presentes en algunos de los ensayos pudo haber afectado las mediciones, porque es conocido que estas deformaciones inducen a errores en los valores de permeabilidad global de la fibra⁵⁸, en especial para los refuerzos Mat y Woven que presentaron una mayor tendencia a deformarse de manera más crítica y constante.

5.4 COMPARACIÓN EXPERIMENTO VS MODELACIÓN

En contraste con las geometrías del frente de flujo experimentales presentadas en la figura 20, en donde se observó una distorsión de la geometría e irregularidades en los refuerzos analizados, en todas las simulaciones CFD realizadas para las diferentes telas, y sus respectivos niveles de porosidad, la geometría del frente de flujo fue completamente circular y regular durante la mayoría del recorrido del fluido, como se

⁵⁸ Endruweit, A; Harper, L; Turner, T; Warrior, N and Long, A. The permeability of random discontinuous carbon fibre preforms. School of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, University of Nottingham, University Park, Nottingham, NG7 2RD, U.K.

aprecia en las figuras 22 y 23. Solo al llegar cerca de las paredes se presentaba una distorsión de esta geometría en el caso de *FLOW-3D*. Este comportamiento concuerda en parte para el caso de tela con núcleo interno de flujo, que presentó una circunferencia básicamente simétrica y circular durante todo el proceso de llenado del molde. Pero para los otros dos refuerzos analizados (mat y woven) fue recurrente la distorsión del frente de flujo en múltiples ensayos experimentales, fenómenos que no se presentaron en ninguna de las simulaciones por CFD.

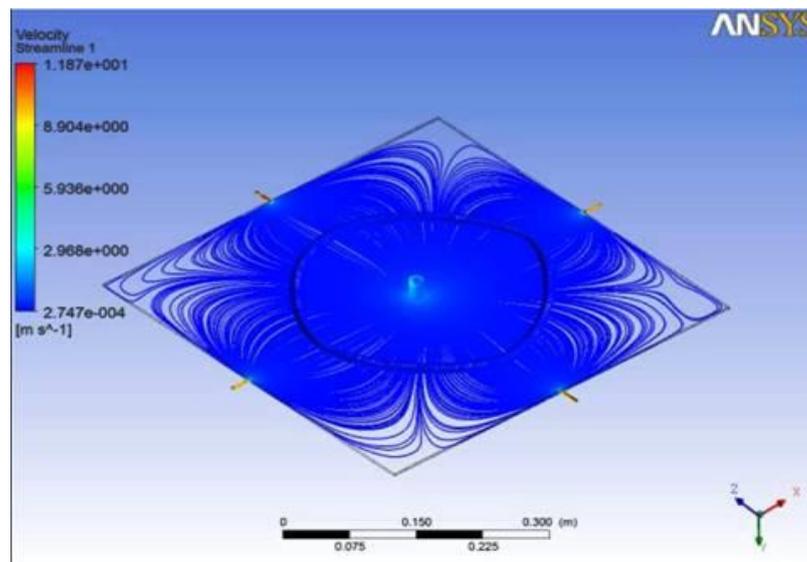


Figura 22. Imagen de una de las simulaciones por CFD en *Ansys Cfx*, en donde se aprecia la forma circular del frente de flujo.

En lo que hace referencia a la comparación de los tiempos de llenado experimentales versus los simulados en los dos programas de CFD, se calculó el porcentaje de error relativo en cada uno de ellos, utilizando para el cálculo de los tiempos simulados los valores de permeabilidad experimentales, tal y como se muestra en la figura 24. Se puede observar entonces que existe un buen grado de aproximación en los tiempos de llenado analizados (error relativo bajo) mediante el programa *FLOW-3D*, para los casos en donde hubo poca distorsión del frente de flujo. En las telas donde la distorsión fue significativa, lo fue así el error relativo.

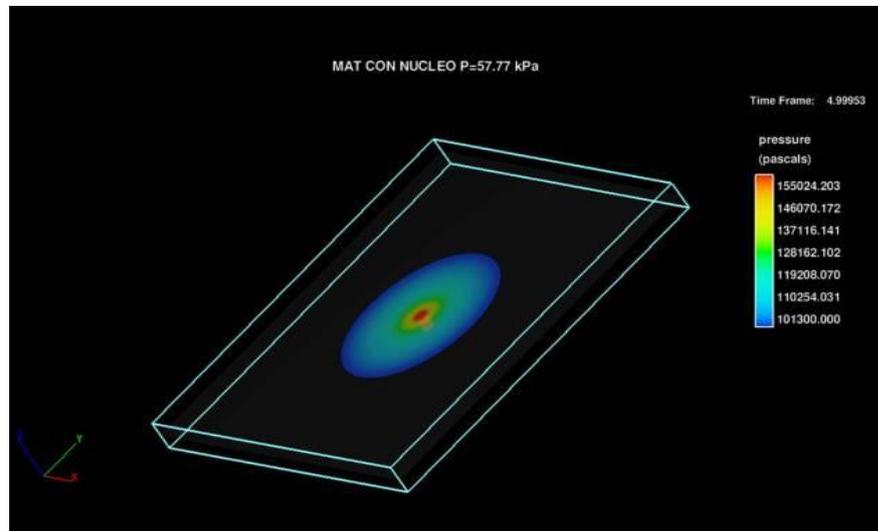


Figura 23. Imagen de una de las simulaciones por CFD en *FLOW- 3D*, en donde se aprecia la forma circular del frente de flujo.

Para el caso del programa *Ansys CFX* existe un alto grado de error en la mayoría de mediciones, en especial en los materiales evaluados donde la porosidad es alta. Por otro lado, el número considerable de factores que intervienen en el flujo de la resina a través de las preformas hace que la predicción numérica de este tipo de procesos sea compleja y requiera de un buen número de ajustes de aproximación, lo que hace que incluso software especializados para este tipo de aplicaciones fallen en sus predicciones.

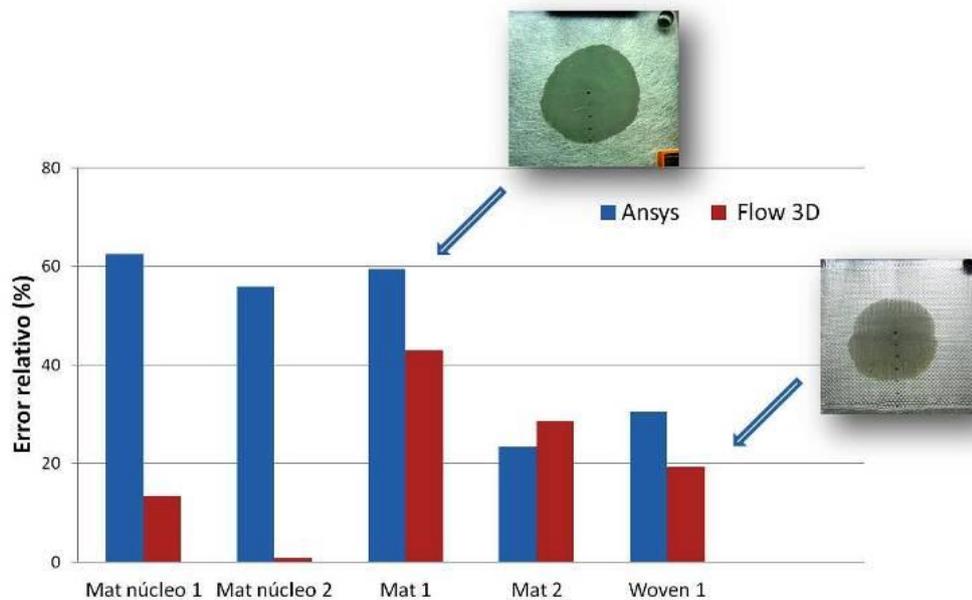


Figura 24. Errores en los tiempos de llenado tiempos entre la simulación y el experimento para una distancia radial 18 cm de de los refuerzos analizados.

Otro fenómeno particular que se observó en algunos de los experimentos con las telas no tejidas discontinuas (mat) y que se encuentra relacionado con el arrastre de fibras al avanzar el proceso de inyección, consiste en la aparición de zonas de mayor permeabilidad que el resto de la preforma. Este fenómeno provoca que el fluido se dirija a la zona de menor restricción que se aprecia visualmente como una línea de avance rápido de flujo (ver figura 25) conocido como “race track”¹².

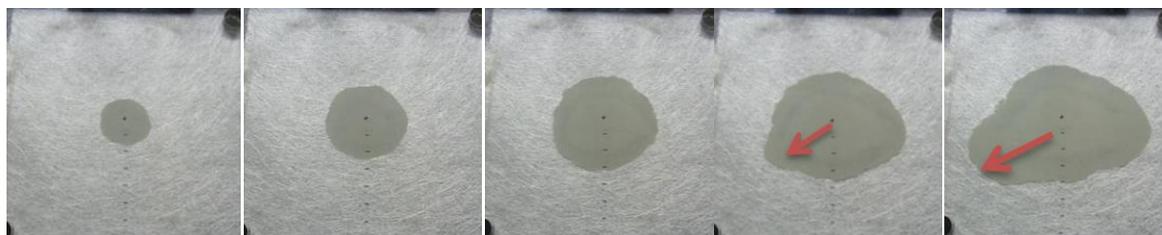


Figura 25. Secuencia de formación de una línea de avance rápido del frente de flujo.

Al comparar la secuencia de imágenes de resultados experimentales contra la simulación (ver figura 26), se aprecia que existen diferencias en los tiempos del frente de flujo para las diferentes posiciones del mismo, y especialmente en posiciones cercanas al puerto de inyección el porcentaje de error es aún mayor, que coincide con los resultados presentados por Hoes et al.³⁹, que obtuvieron errores significativos para tiempos menores a 2 segundos, que están asociados con errores de medición del tiempo y pequeñas irregularidades en el material cercanos al puerto de inyección, como por ejemplo el corte irregular del agujero en la tela.

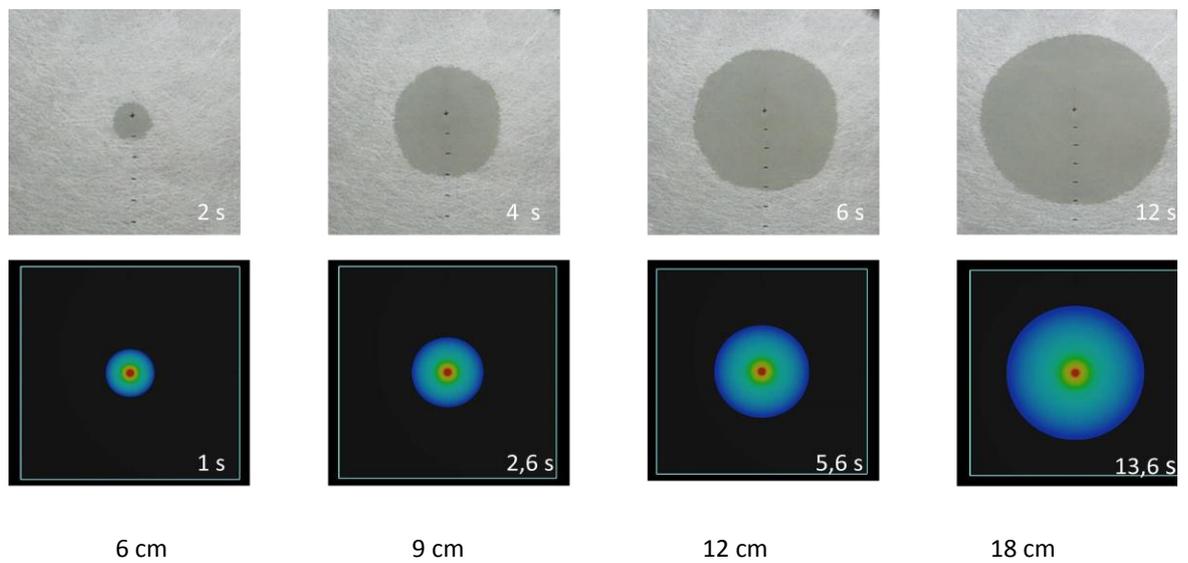


Figura 26. Secuencia comparativa de las posiciones del frente de flujo de los ensayos experimentales para una tela no tejida con núcleo versus la simulación en Flow 3D.

5.5 CONCLUSIONES

Los valores de permeabilidad de los refuerzos o telas obtenidos en este estudio presentan una buena concordancia con los valores reportados por otros investigadores, por lo que se puede llegar a concluir que el método propuesto para la medición de la permeabilidad y los cálculos utilizados mediante la ley de *Darcy* si guardan coherencia, y pueden ser utilizados para estudios posteriores de permeabilidad sobre otros refuerzos.

En este estudio se reportan valores de permeabilidad para un refuerzo especial para RTM llamado manta moldeable que comúnmente es empleado para la fabricación de piezas de carácter ornamental en Colombia y del cual no hay disponible información sobre sus características de flujo, a pesar de ser comúnmente utilizado en procesos de moldeo líquido cerrado. Estos valores encontrados pueden ayudar a la industria nacional a la hora de empezar a involucrar herramientas de simulación a sus procesos de diseño de moldes complejos.

El refuerzo Mat núcleo mostró durante los ensayos realizados un buen comportamiento, debido a que fue fácil obtener un llenado rápido y completo del molde, esta particularidad ha propiciado que sea uno de los refuerzos preferidos de la incipiente industria de RTM en Colombia ya que sin el uso de herramientas de simulación numérica para la fabricación de moldes y la asistencia por vacío del mismo se pueden obtener piezas con pocos defectos en un tiempo aceptable de producción. De otro lado, las telas Mat y Woven analizadas en este estudio y que normalmente se utilizan para procesos de laminación manual presentaron un comportamiento irregular y asimétrico de los frentes de flujo, por lo que es factible que su utilización en RTM produzca problemas como zonas secas o sin humectación, si no se utilizan herramientas de simulación adecuadas.

En la tela tejida bidireccional (Woven) se obtuvieron valores de permeabilidad algo alejados de los reportados por otros investigadores, lo que hace necesario un análisis más riguroso sobre el efecto de las condiciones particulares utilizadas como el líquido permeante, método de inyección y características de compresibilidad en los resultados descritos en este estudio; al igual que las posibles desviaciones en los valores de permeabilidad obtenidos por la utilización de Ley de *Darcy*, ya que es conocido que esta ley presenta desviaciones bajo ciertas condiciones de porosidad y velocidades de frente de flujo, lo que podría estar influyendo en la disparidad descrita anteriormente.

Los programas de CFD utilizados en este estudio para simular los experimentos de permeabilidad realizados, no muestran una suficiente consistencia en los resultados que hagan pensar que puedan ser utilizados sin mayores ajustes en la simulación del llenado de moldes en métodos de moldeo líquido en materiales compuestos de matriz de polimérica, aunque los resultados arrojados por *Flow 3D* muestran que hay una mayor coherencia que los obtenidos en *Ansys*, especialmente para el refuerzo Mat núcleo que mostró una aceptable precisión y que será utilizado en la parte siguiente de este estudio, concerniente a la fabricación de laminados tipo sándwich por RTM. Adicionalmente es factible que con ajustes en el modelo matemático de *Flow 3D* se

pueda mejorar la correlación entre la simulación y los resultados reales de este software para los refuerzos que tienen morfologías difíciles de representar matemáticamente, como las telas tejidas.

Es evidente que la obtención de buenos resultados en simulaciones de llenado en moldes para RTM y otras técnicas similares no solamente está influenciado por emplear unos correctos y reales valores de permeabilidad, ya que para obtener una buena precisión es requerido adicionalmente un software especializado que considere factores especiales en el reforzamiento como orientación de fibras y geometría de canales.

6 FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAMINADOS TIPO SÁNDWICH

Actualmente no es difícil encontrar información teórica y experimental referente al tema del procesamiento y fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica por RTM, aunque en materiales con arquitecturas más complejas como los tipo sándwich aún existen vacíos en la información disponible, especialmente en el tema de las consideraciones prácticas a tener en cuenta para la fabricación de este tipo de materiales con bajos niveles de inconformidades o defectos. En este capítulo se describen las principales consideraciones experimentales encontradas en la fabricación de laminados planos tipo sándwich de poliéster reforzados con fibra de vidrio por la técnica de RTM, abarcando temas como el diseño y la fabricación de un molde específico para este tipo de materiales, utilizando como apoyo la simulación dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante el programa *FLOW-3D*. También hará parte de este estudio el efecto de un importante parámetro de procesamiento, como lo es la presión de inyección, en la resistencia a la flexión de los laminados tipo sándwich fabricados a partir del molde diseñado. Por último se analizará la relación entre resultados obtenidos en los ensayos a flexión y las características morfológicas de los laminados antes de ser ensayados, utilizando para ello las técnicas de microscopía óptica y termografía infrarroja.

La primera etapa a realizar con miras a fabricar materiales compuestos sándwich de matriz polimérica por moldeo líquido es la construcción de un molde para tal fin, que involucra dos procesos principales como lo son: i) el diseño; y ii) la posterior fabricación del molde. A continuación se detallan estos dos procesos.

6.1 DISEÑO DEL MOLDE

Para la fabricación de piezas por la técnica de RTM es indispensable contar con un molde cerrado con características especiales que incluyan canales, puertos de inyección de resina así como salidas de aire y resina que permitan un rápido y completo llenado del mismo, logrando de esta manera la impregnación total del refuerzo. La propuesta de diseño inicial del molde para este estudio fue basado en un tipo de molde para RTM que es comúnmente utilizado a nivel local para fabricar laminados simples (no sándwich), el cual está construido a partir de dos caras, una

superior en donde se encuentran los canales, puertos de inyección y salidas y otra cara inferior lisa utilizada para cerrar el sistema. Este tipo de molde presenta características deseables como una fácil fabricación, diseño simple y factibilidad de llenado para materiales tipo sándwich, convirtiéndolo en buen punto de partida para la propuesta de diseño inicial del molde a ser utilizado.

El sistema de inyección perimetral es otra característica del molde utilizado para la fabricación de laminados planos mencionado anteriormente, el cual consiste en crear un canal alrededor de la pieza a fabricar en donde inicialmente ingresa la resina, y al momento de ser llenado completamente se desborda para impregnar todo el refuerzo desde el exterior hacia el interior. En la figura 27 se muestra un esquema de la cara superior de un molde con sistema de inyección perimetral para fabricar laminados cuadrados, en el cual se observa un canal alrededor de la pieza a fabricar entre un sello exterior (en verde) y un escalón (cuadrado demarcado con doble línea), en donde ingresa la resina por el puerto de inyección ubicada a un extremo del molde. Las flechas grises en la figura 27 indican el trayecto inicial de la resina para llenar el canal perimetral y las flechas azules la forma en que ingresa la resina hacia el centro del molde justo después del completo llenado del canal. En este diseño la salida del molde se encuentra ubicada centralmente en la cara superior del molde.

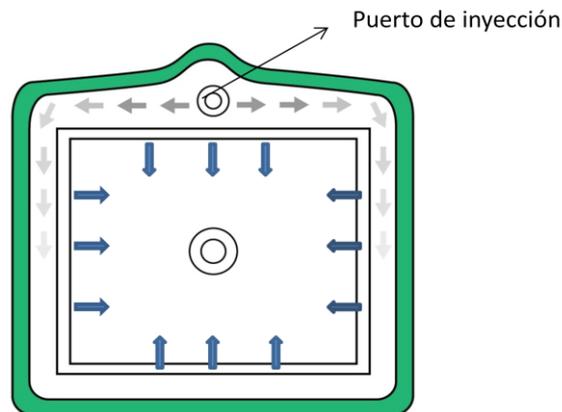


Figura 27. Ilustración del sistema de inyección perimetral utilizado en un molde para fabricar laminados cuadrados.

La figura 28 muestra el esquema de un corte transversal del diseño inicial del molde propuesto, en donde se pueden apreciar dos caras, una lisa ubicada en la parte inferior (color rojo), y otra superior con la cavidad y el sistema de inyección perimetral que permitirían la obtención del laminado tipo sándwich. Las flechas azules mostradas en

la figura 28 indican el poco espaciamiento que debe existir entre el escalón de la cara superior que conforma el canal perimetral y el molde inferior, que permite crear una zona de mayor restricción al flujo y que dificulta que la resina atraviese inmediatamente el escalón, dividiendo la inyección en dos etapas, una primera en la que se llena el canal perimetral y la segunda en la que el flujo va desde el canal hacia el centro del molde.

El material empleado para la construcción de este tipo de moldes es generalmente poliéster reforzado con diferentes configuraciones de fibra de vidrio, debido principalmente a su bajo costo relativo y a su versatilidad en la obtención de geometrías variables y complejas, y fue el seleccionado en este estudio para la fabricación.

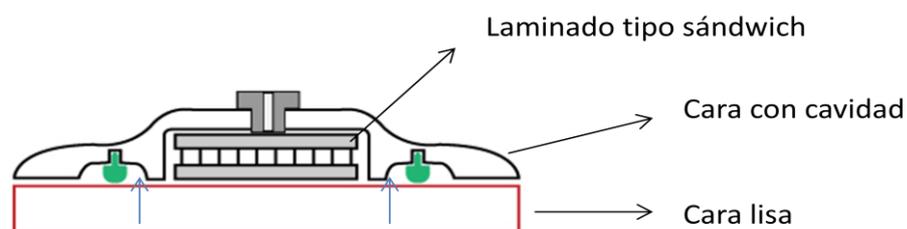


Figura 28. Ilustración de un corte transversal del diseño de la configuración del molde. Las flechas azules indican la ubicación de canal perimetral.

La selección de dimensiones de la cavidad del molde (laminado) se tomó con base en la posibilidad de obtención de al menos seis (6) probetas para el ensayo de flexión a tres puntos bajo la norma ASTM C 393, estableciéndose el ancho y el largo de 250 x 250 mm en el caso del área; y con un espesor de 12 mm.

La efectividad de este diseño inicial de molde para ser llenado fue corroborada mediante la simulación del llenado en un programa de dinámica de fluidos computacional, utilizando particularmente el programa *Flow-3D*, que presentó cierta precisión en los ensayos de permeabilidad presentados anteriormente. A continuación se describen los detalles del proceso de simulación.

6.2 SIMULACIÓN DEL LLENANDO

Inicialmente para la simulación del llenado del molde propuesto fue necesaria la creación del diseño geométrico (CAD) al interior del programa *Flow-3D*, utilizando todas las formas y dimensiones propuestas en la etapa anterior, para luego proceder a realizar el enmallado respectivo. Posteriormente se suministraron al programa los datos de entrada como densidad y viscosidad del fluido, permeabilidad del refuerzo y presión de inyección. El dato de permeabilidad ingresado al programa corresponde a un valor obtenido el capítulo 4 referente a la medición de permeabilidad. También fueron ingresados varios valores de presión de inyección, para identificar algún cambio en la forma en el llenado de molde con respecto a la presión de entrada. En la tabla 5 presenta los valores y rangos utilizados para las simulaciones de CFD.

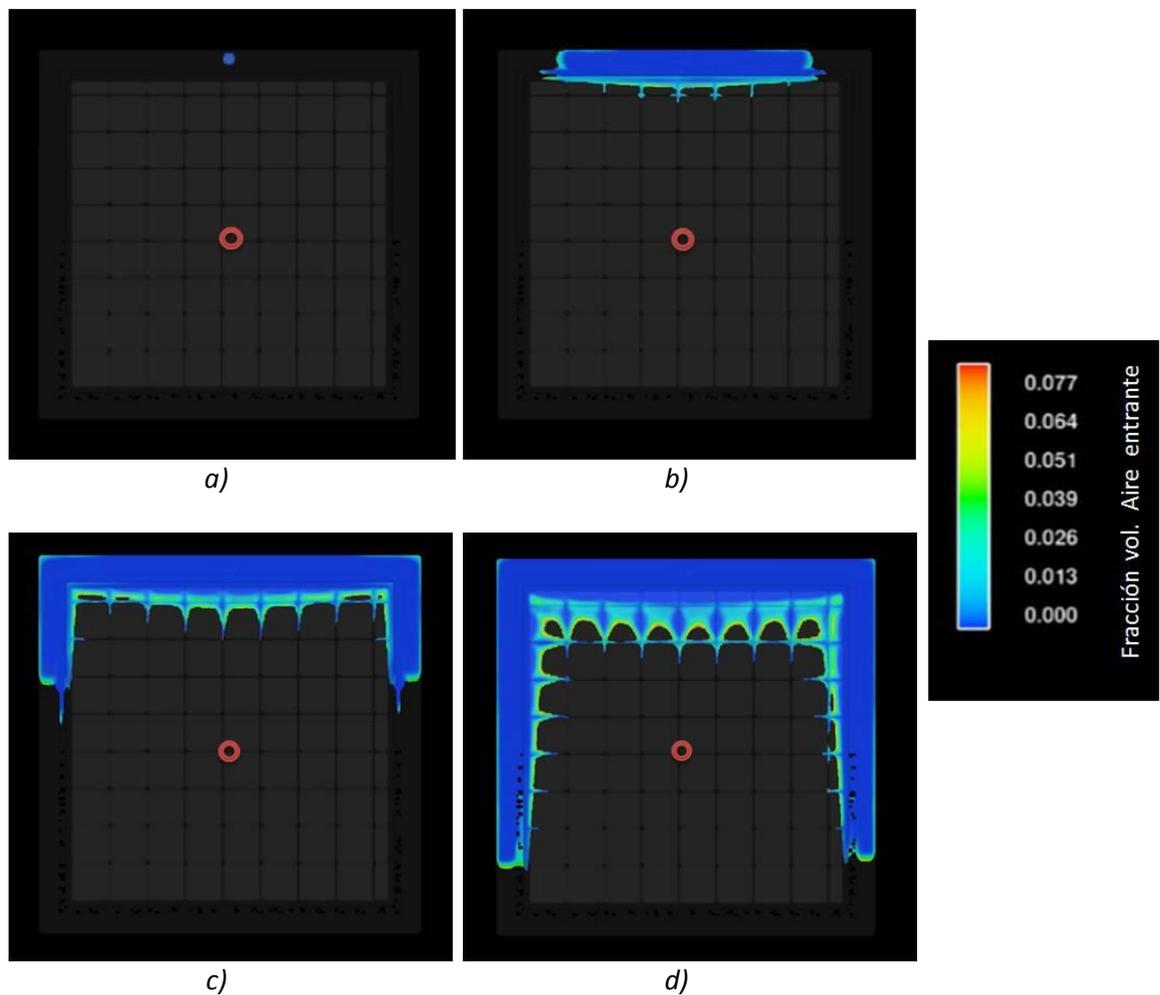
Variable	Datos
Densidad (g/cm ³)	1,13
Viscosidad (Pa·s)	0,22
Permeabilidad (× 10 ⁻⁹ m ²)	5,27
Rango de presión de inyección (bar)	0,276 – 0,552

Tabla 5. Datos de entrada ingresados a *FLOW-3D* para la realización de la simulación.

Las simulaciones de llenado en el molde se generaron con un laminado tipo sándwich al interior, utilizando como refuerzo en las dos alas externas telas del tipo manta moldeable (Mat núcleo 2) y como núcleo interior una espuma sintética liviana que se utilizaría posteriormente para la fabricación real de los laminados (este material será especificado en mayor detalle en la sección 5.4), el cual no es completamente sólido y consta de segmentos cuadrados unidos, que crean canales transversales y longitudinales para el flujo de resina.

La figura 29 presenta la secuencia de imágenes de la simulación del llenado obtenida utilizando una presión de 0,276 bar, estas imágenes representan una vista superior del molde. En el extremo derecho se encuentra ubicada una barra de escala que indica la fracción volumétrica de aire remanente después del llenado. Al inicio de la secuencia

es posible observar el ingreso de la resina por el extremo superior del canal perimetral, y que luego va llenando dicho canal de una manera más rápida que el ingreso de la resina al laminado tipo sándwich, como era previsible debido a una menor restricción de flujo presente en el canal en comparación con la luz presente entre el escalón y la cara inferior del molde. Posteriormente se presenta una masiva impregnación del refuerzo y del núcleo, dándose de manera más rápida en la zona cercana al punto de inyección. El punto de salida de la resina se encuentra representado con una circunferencia roja en el centro de la imagen, y es justo debajo de este lugar en donde se encuentra el último lugar de llenado del molde, que sería un lugar crítico teórico del llenado.



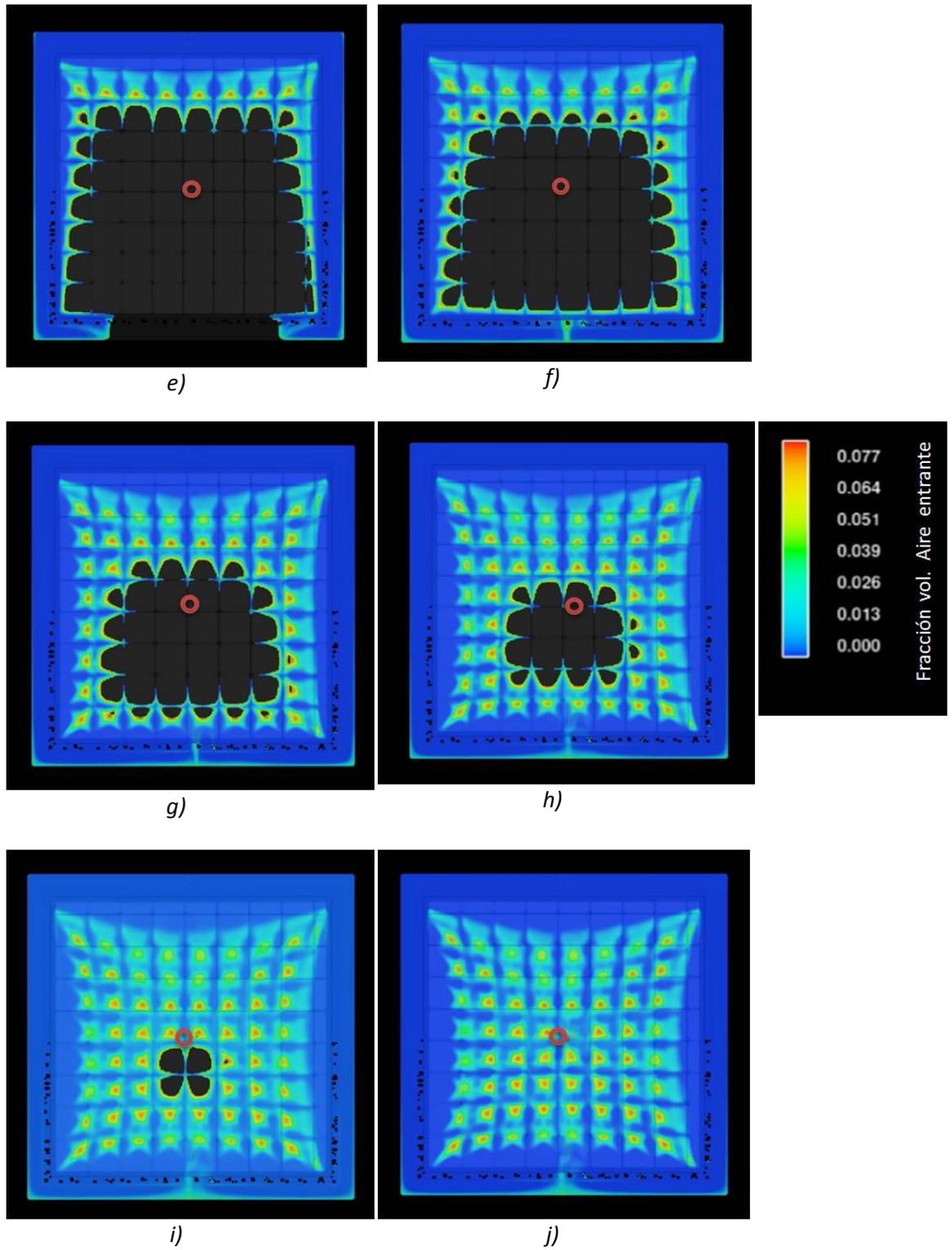


Figura 29. Secuencia de imágenes de la simulación realizada en FLOW-3D del llenado del molde a una presión de 4 psi (0,276 bar).

Otro aspecto importante que resulta de analizar la simulación es la forma como se impregna el núcleo al interior del sándwich. La resina ingresa por las separaciones entre los segmentos cuadrados que componen el núcleo y los envuelve completamente hasta humectarlos, pero como se aprecia en la mayoría de las imágenes existe una tendencia a forma lugares con cierta porosidad (zonas de color amarillo), que aunque presentan valores relativamente bajos (no superior al 7 %), podrían causar detrimento en las propiedades mecánicas finales del laminado.

Se realizaron múltiples simulaciones variando la presión de inyección en el rango de presión especificado en la tabla 5, y no se presentaron cambios significativos en la forma como el frente flujo llena el molde, el único cambio notado consistió en una disminución en el tiempo de llenado para la simulación a medida que se aumento la presión. La aparición de lugares con porosidad (zonas amarillas) también fue constante en todas las simulaciones realizadas, aunque se noto la tendencia al disminuir esas zonas de porosidad con la prolongación de la inyección luego del llenado completo del molde, que se utilizó como parte del procedimiento para fabricación de los laminados.

De acuerdo con el análisis de las diferentes secuencias de llenado a diferentes presiones y a través de todo el espesor del laminado, se estableció que es factible el completo llenado del molde propuesto sin zonas secas o presencia de defectos importantes, por lo cual se procedió entonces a la fabricación del molde.

6.3 FABRICACIÓN DEL MOLDE

El molde fabricado para la obtención de los laminados planos se realizó de acuerdo a las consideraciones establecidas en la etapa de diseño anterior, este consta de dos caras (partes), un cara inferior plana y otra cara superior con la cavidad de la forma que se desea obtener y con las conexiones necesarias para realizar la inyección y salida de aire y resina; para este último fue necesario la fabricación del modelo positivo, que será descrito más adelante. A continuación se describirán las materias primas utilizadas en la fabricación del molde, al igual que los procedimientos realizados.

6.3.1 Materiales

Inicialmente se hará una breve descripción de los materiales empleados para la fabricación del modelo positivo y los utilizados en la construcción de las dos caras del molde. Los materiales empleados en la construcción del modelo y el molde, en su mayoría fueron adquiridos a través de proveedores locales de insumos para la fabricación de poliéster reforzado con fibra de vidrio.

- Materiales para el modelo

Para la obtención de la geometría positiva sobre la cual realizar el proceso de laminación se utilizó múltiples capas de cera calibrada de 1 mm de espesor y una lámina maquinada de PE UHMW (polietileno de ultra alto peso molecular) con dimensiones de 250 x 250 x 12 mm dispuestas sobre una superficie lisa (lámina de vidrio templado). Las imágenes de las materias primas se pueden observar en la figura 30.



a)



b)

Figura 30. a) Lámina de PE UHMW empleada para generar la cavidad del molde. b) Cera calibrada utilizada para generar relieves del molde.

- Materiales para la fabricación del molde

En la construcción de las dos caras del molde se utilizó resina de poliéster insaturada preacelerada del tipo ortoftálica de la referencia Cristalan® 809 de *Andercol*, la cual fue catalizada mediante meck peróxido de la serie Norox® meck 9 de *Syrgis*. Los refuerzos utilizados fueron telas de fibra de vidrio de la marca *Owens Corning*, en dos presentaciones: mat y tejida bidireccional (woven roving) con gramajes de 450 y 850 g/m², respectivamente. A las dos caras del molde se les aplicó una capa superficial (gel coat) transparente del tipo poliéster insaturado isoftálica, de la referencia Cristalan® 894 de *Andercol*. En el caso particular de la cara lisa inferior se utilizó un material tipo

núcleo Coremat® de 4 mm de la marca *Lantor* para incrementar el espesor (ver figura 31).



Figura 31. Coremat® utilizado para la fabricación de la cara lisa del molde⁵⁹.

Para los conductos de entrada y salida de resina en la cara superior del molde se utilizaron accesorios para RTM de la marca MVP (*Magnum Venus Plastech*), en particular insertos roscados de acero y racores de poliamida de la referencia 2145 (ver figura 32 *a*)). Estos poseen un diámetro interior de 10 mm. De la misma serie de accesorios se utilizó un sello verde de silicona en forma de champiñón para el exterior del molde que ayuda a prevenir fugas de resina durante la inyección (ver figura 32 *b*).



a)



b)

Figura 32. *a)* Insertos utilizados para el puerto de inyección y salida de resina. *b)* Sello en forma de champiñón del molde⁶⁰.

⁵⁹ <http://easycomposites.co.uk/products/core-materials/coremat-5mm.aspx>

⁶⁰ <http://mv.dmocho.one.pl/attachments/RTM%20accessories.pdf>

6.3.2 Procedimiento de fabricación del molde

En esta sección se detallan los procedimientos seguidos para la construcción de la cara lisa del molde, la cara superior con la cavidad y el modelo positivo para generar la cara superior.

- Cara lisa del molde (inferior)

Se inició la construcción a partir de una superficie lisa, para este caso un vidrio templado con las dimensiones del molde demarcadas con cinta de enmascarar (350 x 350 mm), al cual se aplicaron dos capas consecutivas en direcciones perpendiculares del gel coat catalizado con mek peróxido en una cantidad de 2%. Luego de verificar el estado “tactoso” del gel coat se procedió por medio de laminación manual a aplicar capas consecutivas de mat - mat - woven roving- mat - núcleo coremat® - mat - woven roving- mat teniendo especial cuidado en catalizar la resina al 1% y dejando 6 horas entre cada laminación, con el fin de evitar deformación debido al calor generado por la reacción exotérmica de curado. El desmoldeo de la superficie de vidrio fue aproximadamente una semana luego de haber iniciado el proceso de fabricación, utilizando cuñas plásticas diseñadas para tal fin. Finalmente se procedió a cortar y a pulir los bordes para obtener lados rectos y lisos.

- Modelo positivo

Al igual que el procedimiento para la fabricación de la cara lisa del molde, se parte de una lámina de vidrio y con la zona de laminación demarcada. Posteriormente se ubicó la placa polimérica en el centro de la demarcación y se procedió a ubicar los tramos de cera calibrada previamente cortados de acuerdo a las geometrías y dimensiones requeridas para la creación de los canales y relieves. Preliminarmente a la ubicación de la placa de PE se redondearon las aristas sobre las cuales se laminaría para que el refuerzo impregnado copie de mejor forma la geometría y evitando la generación de vacíos (puenteo de la fibra), y también obtener adecuados ángulos de desmoldeo. Adicionalmente se realizó una perforación pasante a través del espesor de dicha placa, con la finalidad de poder inyectar aire a presión al final del proceso y así facilitar la extracción del molde ya construido.

Mediante el posicionamiento de tramos de cera calibrada una sobre otra se realizaron superficies positivas y negativas que por medio de la laminación sobre ellas generarían cavidades y escalones respectivamente en el molde. Para obtener el canal donde se insertaría el sello verde en forma de champiñón mostrado en la figura 32, se utilizó el mismo sello realizando el corte de las alas y obteniéndose así una sección rectangular. Para la parte final en la construcción del modelo se redondearon la parte perimetral del modelo y se suavizaron aristas para facilitar la laminación. En la figura 33 se muestra el modelo ya terminado.

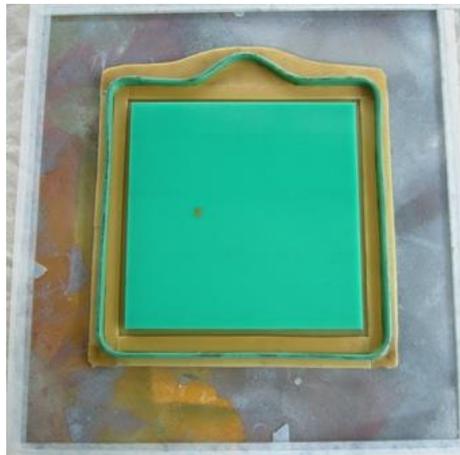


Figura 33. Imagen del modelo positivo finalizado.

- Cara superior con la cavidad

Se inició con la aplicación del gel coat sobre el modelo con las consideraciones y procedimientos empleados en la cara lisa del molde. Posteriormente se ubicaron los insertos metálicos en los sitios de inyección y salida de resina en el momento en que el gel coat se encontró en estado tactoso. Se procedió entonces a laminar con una capa de tela mat, previamente cortada con una forma que permitiera un fácil posicionamiento.

Durante la aplicación de la primera capa se tuvo especial cuidado en recubrir la parte inferior de los insertos metálicos, para lograr así una ubicación estable de estos. Luego

del curado de la primera capa quedaron fibras sobresalientes en varios lugares de la superficie, especialmente en los cambios de curvatura fuertes, para lo cual fue necesario pulir esas imperfecciones para facilitar el proceso de laminación posterior; esta operación se puede apreciar en la figura 34.



Figura 34. Imagen del proceso de pulido de las fibras sobresalientes luego de cada laminado.

Luego de la aplicación de una primera capa de mat, siguió la aplicación de capas consecutivas de mat – woven roving – mat teniendo las consideraciones de tiempo y catalización descritas en la cara lisa del molde, hasta alcanzar el espesor requerido. Luego de aproximadamente una semana de la aplicación de la última capa se procedió a retirar el molde del vidrio y a desmoldar todos los elementos del modelo positivo, como se aprecia en la figura 35.



Figura 35. Imagen del proceso de de retirado de los elementos del modelo positivo del cara superior del molde.

Luego de finalizar la etapa de limpieza del modelo positivo se identificaron algunas inconformidades en esquinas y aristas más pronunciadas, las cuales fueron corregidas mediante la aplicación de masilla de poliéster (color rojo) y varias operaciones de lijado en agua. En la figura 36 se muestra la parte interior del molde y algunas zonas masilladas listas para ser lijadas posteriormente.

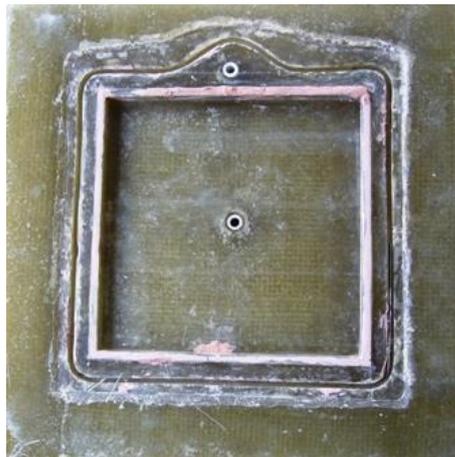


Figura 36. Imagen de parte interna de la cara superior con la cavidad luego de retirado de los elementos del modelo positivo

Debido a que el molde inmediatamente después de ser fabricado tiene una gran tendencia a que las piezas obtenidas queden adheridas al molde, se procedió a la aplicación de 8 capas de cera hasta alcanzar condiciones apropiadas para la fabricación de los laminados, las consideraciones más importantes en este apartado se describen a continuación.

6.4 FABRICACIÓN DE LAMINADOS

En esta sección se describen los materiales y equipos empleados en la fabricación de los laminados tipo sándwich mediante RTM, y los procedimientos y condiciones seguidos para la obtención de los mismos.

6.4.1 Materiales y equipos

Para la elaboración de los laminados tipo sándwich se utilizaron tres materiales: refuerzo, núcleo y resina, los cuales son descritos a continuación.

- *Manta moldeable*: este tipo de refuerzo especial para RTM, el cual fue descrito y analizado en la sección 4.2.1.
- *Núcleo*: Para el centro del sándwich se utilizó una espuma estructural de PVC, de la marca *DIAB* y la referencia Divinycell® H80, de 10 mm de espesor y densidad de 80 kg/m³ (ver figura 38). Este tipo de núcleo es compatible con resinas de poliéster, viniléster y epóxicas, incluso resinas con altos contenidos de estireno y puede ser utilizada en procesos de manufactura como laminación manual, moldeo en bolsa de vacío, infusión y RTM⁶¹.

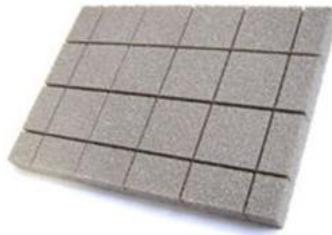


Figura 37. Núcleo empleado para la fabricación de los laminados tipo sándwich⁶².

- *Resina*: Se empleo la resina de poliéster ortoftálica utilizada para los ensayos de permeabilidad (ver sección 4.2.1). Esta resina no es especialmente diseñada para RTM pero debido a su gran contenido de sólidos, pero es adaptable a este tipo de proceso. Para lograr una viscosidad adecuada se disolvió en estireno hasta lograr una viscosidad de 0,22 Pa*S, y se modificó la cantidad de acelerante hasta obtener una temperatura exotérmica menor a 160 °C.

⁶¹ http://www.diabgroup.com/americas/u_products/u_divinycell_h.html

⁶² <http://www.saveonfiberglass.com/View/12-Divinycell-GSW-H-80>

- *Máquina para la inyección:* Se utilizó el equipo de RTM también empleado para pruebas de permeabilidad, de la marca Magnum Venus Products (MVP) de la serie Patriot™. En la figura 38a se muestra el panel de control de la máquina, en donde se pueden ajustar entre otros parámetros, la presión de inyección y de solvente y número de pulsos de la bomba (cantidad de resina).



a)



b)

Figura 38. a) Panel de control para la inyección. b) Equipo de inyección utilizado para la fabricación de laminados.

6.4.2 Proceso de fabricación

Para la elaboración de los laminados tipo sándwich se procedió a cortar el núcleo de espuma de PVC y las telas Mat núcleo a unas dimensiones acordes a las de la cavidad del molde, pero debido al diseño específico de este último, fue necesario dejar un espaciamiento entre el material sándwich a fabricar y las paredes de la cavidad de aproximadamente 2 mm en los cuatro lados, para facilitar el ascenso de la resina durante la inyección hacia la cara superior del laminado sándwich. Se ubicaron entonces las telas y el núcleo en la secuencia adecuada al interior del molde para luego proceder a cerrarlo y ajustarlo con prensas tipo C para evitar fugas de resina en el momento de la inyección, en la figura 39 se aprecia el molde listo para ser inyectado. Para el cierre del molde se utilizaron ocho de prensas apretadas en forma de cruz para una adecuada distribución de la fuerza de cierre.

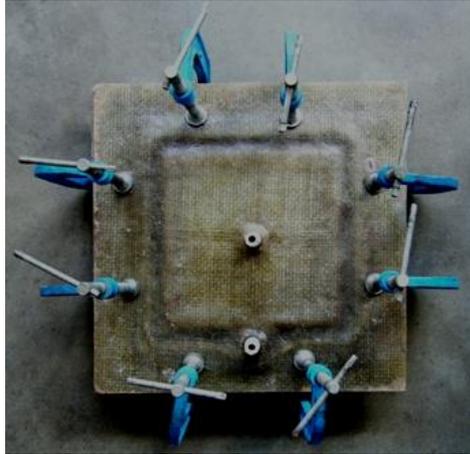


Figura 39. Molde empleado para la fabricación de laminados tipos sándwich listo para ser inyectado.

Antes de empezar el proceso de inyección se verificaron los niveles de líquidos indispensables para la fabricación y el correcto funcionamiento del equipo, como mek peróxido y el líquido limpiador (también llamado solvente). También fue necesario chequear que la línea de presión de aire comprimido que alimenta la máquina de RTM estuviera en el valor mínimo recomendado, ya que sin el líquido limpiador, cantidad mínima de catalizador o la presión adecuadas pueden provocarse diversos problemas de calidad en el laminado y daños en el equipo. Posteriormente se procedió a cargar y presurizar el sistema de alimentación y catalización del equipo de inyección con resina y mek peróxido respectivamente, teniendo especial cuidado en purgar el aire atrapado en las líneas de conducción de estos dos fluidos durante estos procedimientos. Otra de las operaciones básicas realizadas antes de iniciar el proceso de inyección es ajustar el porcentaje de catalización a ser utilizado, ya que es un procedimiento que se debe realizar de manera manual y mecánica para este equipo, que para estos ensayos se fijo en un 2%.

Luego la realizar una inyección de prueba de tiempo de gel para la resina y así establecer el correcto funcionamiento del equipo y el estado del catalizador, se procedió a conectar la pistola de la máquina al molde para realizar la inyección y fabricar los laminados. En este estudio se realizaron ensayos a tres presiones diferentes: 8, 13 y 20 psi (0,004 – 0,006 – 0,01 bar), los laminados fabricados se muestran en la figura 40.

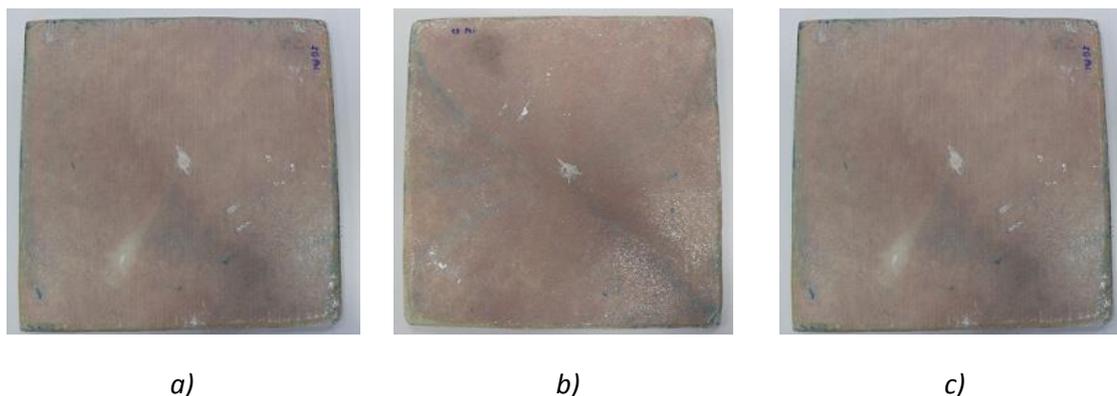


Figura 40. Placas fabricadas a tres diferentes presiones: a) 8, b) 13 y c) 20 psi.

Para la determinación de las presiones a las cuales se realizarían los laminados fue necesario inicialmente establecer un rango de esta variable en el cual se obtuvieran resultados aceptables, ya que a diferencia de los resultados obtenidos mediante la simulaciones en CFD a diferentes presiones que mostraron un llenado completo y con bajos niveles de porosidad, se pudo establecer a través de ensayos preliminares un valor máximo de presión a utilizar donde provocaba movimientos en el núcleo y defectos considerables apreciables a simple vista. Para la escogencia de estos tres valores específicos de presión estuvo limitada a las marcaciones disponibles de la carátula del manómetro del equipo de RTM, ya que esta carátula solo presentaba pocas marcaciones, es decir una escala poco precisa; esto dificultó establecer otros valores de presión.

Luego de fabricados todos los laminados se sometieron a un proceso de postcurado en un horno a 80 ° C durante cuatro horas, para garantizar que todos los laminados presentaran un mismo grado de curado y así obtener resultados representativos de los ensayos mecánicos. A continuación se describen los procesos y equipos utilizados para la caracterización mecánica y morfológica realizada sobre las muestras obtenidas.

6.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS LAMINADOS

Los laminados sándwich obtenidos fueron sometidos a diferentes métodos de ensayo para identificar la relación entre la presión de inyección y la resistencia mecánica, específicamente en la resistencia a la flexión. Inicialmente se sometieron los laminados fabricados a la técnica de termografía infrarroja para la determinación de defectos macroscópicos, y posteriormente la microscopía óptica sobre secciones transversales de los laminados (probetas) para la evaluación de la morfología de los

defectos o discontinuidades más pequeñas. Finalmente se realizaron ensayos a flexión en tres puntos sobre probetas obtenidas de los laminados para establecer su comportamiento mecánico.

6.5.1 Termografía infrarroja

La termografía es una técnica de análisis no destructiva que está siendo utilizada con frecuencia para la evaluación de la integridad de materiales compuestos tipo sándwich^{63 64}, por lo cual se utilizó en este estudio esta técnica para la identificación de defectos mediante la obtención de los cambios de temperatura en la superficie de las placas fabricadas. Los equipos y el procedimiento empleados se describen a continuación:

- Equipos

En la figura 41 se muestra la cámara termográfica infrarroja utilizada para las mediciones, es un dispositivo MobIR® M8 que puede generar termogramas de 2 megapíxeles y con una sensibilidad térmica de 0.1 a 30 °C.



Figura 41. Cámara infrarroja utilizada para la visualizar problemas en los laminados⁶⁵.

⁶³ Dattoma, V; Marcuccio, R; Pappalettere, C and Smith, G. Thermographic investigation of sandwich structure made of composite material. NDT & E International. 34 (2001), P 515-520.

⁶⁴ Krell, T; Brandenburg, R and Lauterborn, E. Comparative Investigation of Pulse Thermographic and Shearographic Testing of Composite Materials. 9th European NDT Conference (ECNDT) September, 25-29, 2006 - Berlin, Germany.

⁶⁵ <http://www.guideinfrared.es/a1-thermography-camera.html>

Para la realización de los ensayos fue necesario calentar los laminados obtenidos de manera uniforme, para lo cual se utilizó un horno para secado del tipo BINDER VD-23-UL (ver figura 42).



Figura 42. Horno empleado para calentamiento de laminados para ensayos de termografía.

- Procedimiento

Inicialmente se fabricó un laminado de prueba con algunos defectos generados intencionalmente para permitir su clasificación e identificación en las imágenes termográficas posteriores, este procedimiento facilitó el proceso de caracterización en las placas fabricadas por RTM dado que no se conocía la forma y ubicación de los defectos que podrían ser encontrados en dichas placas. En la figura 43 se muestra la termografía de una de las placas de prueba tipo sándwich, en la cual se utilizaron materiales de similares características para las dos alas del sándwich, una resina de poliéster translúcida y mat de fibra de vidrio, y para el núcleo la espuma *Divinycell*[®] utilizada en los laminados a estudiar. En esta placa básicamente se generaron dos tipos de defectos, el primero referente a una delaminación en la zona superior que se muestra en la imagen de color rojo, y que denota una zona de mayor temperatura (indicación *a*) en la figura 43), y la segunda relacionada con la ausencia de un bloque central del núcleo, que se aprecia de color rojo más intenso que la delaminación y que se puede apreciar de manera fácil en el centro de la imagen termográfica como un cuadrado de color rojo, indicado como *b*) en la figura 43.

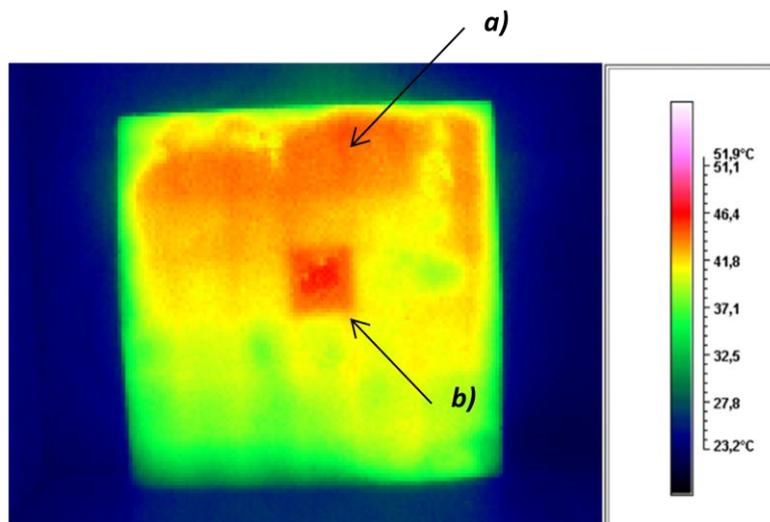


Figura 43. Termografía del laminado de prueba con defecto central (b) y delaminaciones (a).

De estos ensayos preliminares también se detectó que si se disminuía el acabado brillante de la superficie de las placas de prueba se mejoraba la calidad de la imagen en la cámara termográfica, debido a que superficies con menor brillo generan una mayor emisividad (mayor radiación), y la cámara detecta de manera más fácil puntos con poca radiación. Se procedió entonces a disminuir el acabado brillante de las placas, por medio de un revelador no acuoso en aerosol de la marca *Magnaflux* del tipo SPOTCHECK® SKD-52, utilizado generalmente como revelador en ensayos no destructivos de líquidos penetrantes, que además de proporcionar un acabado mate proporciona un rápido secado. El proceso consistió en depositar una capa fina y homogénea sobre las dos superficies de la laminas (ver figura 44), realizando aplicaciones horizontalmente y luego verticales para obtener un espesor constante.



Figura 44. Aplicación del revelador en la superficie de las placas para disminuir el brillo.

En la figura 45 se aprecia la comparación entre el color original de las placas, y el obtenido luego de aplicar el revelador. La coloración blanca es provista por partículas finas (polvo) que están débilmente adheridas a la superficie, por lo que se debió manipular cuidadosamente para no desprender la capa.

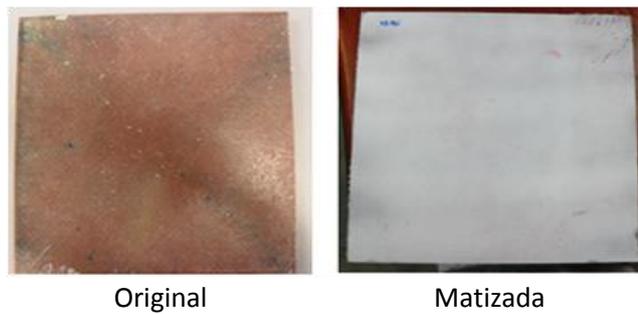


Figura 45. Comparación entre placas sin pintar y matizada.

Luego de matizar las placas se calentaron hasta una temperatura de 60 °C en el horno de secado ya mencionado, dejándolas allí un tiempo superior a 10 minutos para garantizar una temperatura uniforme en el momento de realizar la medición. Posteriormente se situaron cada una de las placas en el montaje dispuesto para las mediciones (ver figura 46), el cual consta de la cámara situada sobre un soporte y una caja de cartón en donde al interior se ubica la placa. La caja fue utilizada como un aislante de la radiación que pueda haber alrededor y afecte la imagen termográfica, adicionalmente contaba con una marcación dentro de ella para ubicar en el mismo sitio la placa. La cámara permaneció fija y a la misma distancia de la placa en todos los ensayos (800 mm), y para la fijación de la cámara en el soporte se utilizó cinta doble faz al igual que el soporte. Se tomaron de 5 a 7 fotografías por placa, con un intervalo de aproximadamente 30 segundos entre cada toma de imagen, dado que aproximadamente en ese período de tiempo ocurrían cambios notables en la coloración de los termogramas.

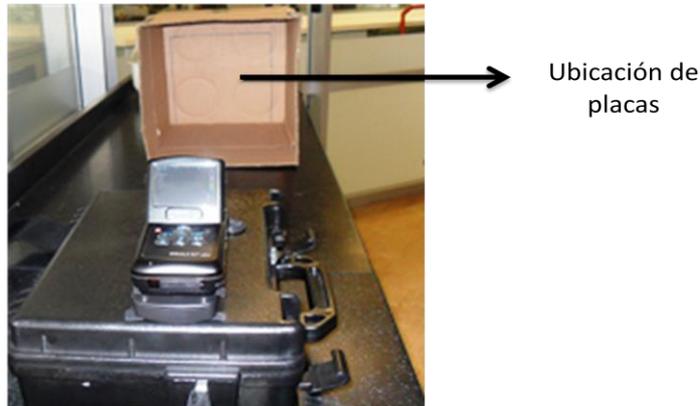


Figura 46. Montaje empleado para los ensayos utilizando una caja de cartón.

Las imágenes termográficas obtenidas fueron procesadas mediante el programa Guide IrAnalyser®, permitiendo introducir isotermas, cambiar paletas de color, ubicación de el punto de mayor temperatura, entre otros recursos para resaltar diferencias de radiación térmica (mayor contraste visual entre los colores) y facilitar la ubicación de zonas con posibles discontinuidades o defectos.

Debido a que la termografía infrarroja tiene ciertas limitaciones en cuanto a la detección de pequeñas imperfecciones o defectos⁶⁶, se realizó una caracterización morfológica por medio de un microscopio óptico, el equipo y el procedimiento utilizado se describen en la siguiente sección.

6.5.2 Microscopia óptica

En este estudio la técnica de microscopia óptica permitió la observación de defectos que no son visibles o parcialmente por el ojo humano, mediante la utilización de un microscopio, los detalles del microscopio y procedimiento empleado se describen a continuación:

⁶⁶ Hamidi, Y and Altan, M. Spatial variation of void morphology in resin transfer molded E-glass/epoxy composites. *Journal of materials science letters* 22 (2003), p 1813 – 1816.

- Equipo

Para la observación de los defectos que no son posibles de identificar a través de la inspección visual y la termografía se utilizó un microscopio marca ZEISS del tipo STEREO STEMI SV8 (ver figura 47). Las muestras se examinaron con un aumento de 25 X.



Figura 47. Microscopio utilizado para la identificación de defectos.

- Procedimiento

El objetivo propuesto para esta técnica era la identificación de pequeños defectos al interior de los laminados y la forma de estos, especialmente cerca al núcleo del sándwich. Para lo cual se procedió a cortar transversalmente al espesor los laminados, aprovechando este procedimiento para obtener inmediatamente las probetas para los ensayos mecánicos de flexión posteriores. Se cortaron ocho probetas por cada placa de 25,4 mm de ancho y del largo de la placa. El corte de las placas se realizó en la misma dirección y ubicación, teniendo en cuenta el punto de salida de la resina y la forma en cómo se ubicó en el molde, como se aprecia en la figura 48.



Figura 48. Forma de los cortes transversales al espesor en los laminados fabricados.

Para el corte se utilizó una cortadora circular de mesa con disco diamantado, que aunque generaba un corte relativamente preciso, se requirió un proceso de pulimiento posterior a cada uno de los lados de las probetas para suavizar la superficie. Posteriormente se requirió destapar los poros llenos de polvo del proceso anterior con aire comprimido. Se debió tener especial cuidado en no mezclar las probetas de diferentes condiciones para así tener un nivel de confiabilidad adecuado.

Para cada una de las probetas obtenidas se realizaron guías aproximadamente cada tres centímetros en puntos específicos (ver la Figura 49) para determinar el punto donde se realizó la observación con el Microscopio. Esta observación abarca 5 mm y con base en estas se tomaron los datos de la cantidad de defectos observados, tales como poros, delaminaciones y falta de impregnación de la resina en el núcleo del sándwich y la fibra de vidrio. Teniendo así datos suficientes para estimar el porcentaje de porosidad que se presenta en cada placa inyectada.



Figura 49. Marcación en la sección transversal de las probetas para la observación al microscopio.

Una vez preparado el microscopio, se procede a analizar cada una de las probetas (24 probetas en total) en las alas del sándwich, que corresponden al laminado superior e inferior. Todo esto con el fin de encontrar en cada medición la cantidad de defectos,

para obtener una medición estimada de la cantidad de espacios vacíos (% porosidad) que hay por punto de medición de la placa.

Los datos de porosidad obtenidos para cada región fueron organizados en una cuadrícula de acuerdo a su ubicación espacial en el laminado, generándose dos cuadrículas para cada placa (superior e inferior), que posteriormente con la ayuda del programa MatLab fueron graficadas generándose una imagen de la distribución de porosidad para el área de los laminados.

6.5.3 Caracterización mecánica

El comportamiento mecánico de las diferentes muestras obtenidas se estudió mediante la realización de ensayos de flexión a tres puntos, según los procedimientos y recomendaciones establecidas en la norma ASTM C 393-94 (“Standard Test Method for Flexural properties of Sandwich Constructions”). A continuación se describe el equipo y el procedimiento utilizado:

- Equipo

El equipo utilizado para realizar los ensayos fue una máquina universal de la marca *Instron*, modelo 3366, como se puede apreciar en la figura 50. Esta máquina pertenece al laboratorio de materiales de la universidad EAFIT.



Figura 50. Máquina universal *Instron* utilizada para la los ensayos de flexión a tres puntos.

- Procedimiento

Las dimensiones de las probetas utilizadas para los ensayos fueron 250 x 25.4 x 14 mm, y se realizaron un mínimo de seis ensayos para cada presión de inyección analizada. Para la realización de estos ensayos se ubicaron las probetas en la máquina universal sobre dos apoyos con una separación entre ellos de 175 mm, para luego ser aplicada la carga en la mitad de la probeta mediante una cruceta que desciende a una velocidad determinada.

Se realizó un primer ensayo de prueba a una velocidad de la cruceta de 2 mm/min y se encontró que existían dos fenómenos particulares, el primero relacionado con un aplastamiento local del núcleo justo debajo de la nariz, como se puede apreciar en la figura 51a, que para solucionarlo la norma ASTM recomienda el uso de un “pad” entre la nariz y la probeta para distribuir la carga sobre un área mayor de la probeta, y así disminuir el aplastamiento, por cual se fabricó un “pad” de aluminio para ser empleado en los siguientes ensayos (ver figura 51b). El segundo fenómeno presentado fue que la carga máxima obtenida este ensayo se obtenía en un tiempo superior a 6 minutos, y la norma ASTM establece que la carga máxima debe ser obtenida en un rango de tiempo entre 3 a 6 minutos, por lo cual se seleccionó una velocidad para los ensayos de 5 mm/min.

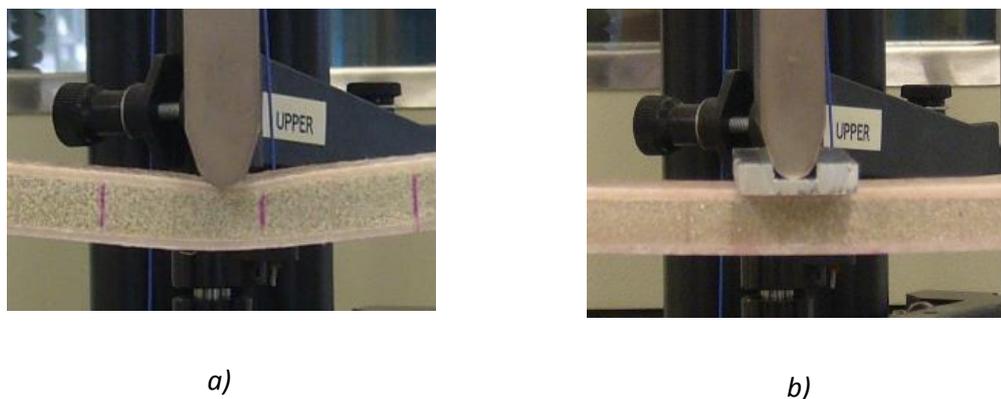


Figura 51. a) Aplastamiento del núcleo presentado en el primer ensayo de prueba. b) “Pad” utilizado para minimizar el aplastamiento del núcleo en los ensayos de flexión.

Una vez realizados los ensayos, el software de la máquina entrega un gráfico de carga ejercida frente al desplazamiento de la cruceta, a partir de las cuales se pueden obtener curvas de esfuerzo - deformación, y calcular valores de resistencia máxima a flexión (σ), mediante la ecuación¹⁴:

$$\sigma = \frac{3 PL}{2wb^2}, \quad (8)$$

donde P es la carga máxima en el punto de rotura, L es la distancia entre apoyos, w es el ancho de la probeta y b es el espesor de la misma.

Otra de las propiedades que generalmente son calculadas para este tipo de materiales es la resistencia a la flexión de las caras de los laminados (σ_f) para laminados simétricos, la cual está dada por⁶⁷:

$$\sigma_f = C \frac{LP}{wt_f(t_c+t_f)}, \quad (9)$$

donde C es $\frac{1}{4}$ si el ensayo es apoyado en tres puntos, t_f el espesor de las alas y t_c es el espesor del núcleo.

6.6 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Esta sección expone los resultados obtenidos en la caracterización mecánica y morfológica de los laminados tipo sándwich fabricados, buscando establecer inicialmente el efecto que tiene la presión de inyección en la resistencia a la flexión de los laminados, para luego relacionar los defectos o imperfecciones encontrados por medio de la termografía IR y microscopia óptica con la resistencia a flexión de los laminados y la presión de inyección. Finalmente se describirá el procedimiento para la realización pruebas mediante termografía infrarroja para este tipo de materiales.

6.6.1 Relación entre la presión de inyección y propiedades mecánicas

Los resultados de resistencia máxima a la flexión de los tres diferentes laminados se muestran en la tabla 8, en donde se aprecia que los valores más altos de resistencia a la flexión fueron obtenidos en las placas fabricadas a 8 y 13 psi, presentándose un mismo valor (46 MPa) si tenemos en cuenta el error experimental. La placa fabricada a

⁶⁷ Dai, J and Hahn, H. Flexural behavior of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding. Composite Structures 61 (2003), pag 247–253.

20 psi presentó el menor valor de resistencia como era de esperarse, ya que a simple vista era posible observar zonas que no fueron impregnadas durante el proceso de inyección. Este comportamiento podría llevar a pensar inicialmente que al aumentar la presión de inyección disminuyen las propiedades mecánicas. Hayward et al⁴³ en su estudio sobre el efecto de las variables de procesamiento en la calidad de partes moldeadas por RTM encontró una ligera disminución en la resistencia a la flexión a media que aumento la presión en la fabricación de laminados planos, reportando un detrimento en la resistencia a la flexión de un 10 % cuando cuadruplico la presión de inyección.

Laminado	Resistencia a flexión σ (Mpa)
8 psi	46,4 \pm 2,1
13 psi	45,6 \pm 1,8
20 psi	42,0 \pm 5,6

Tabla 8. Resistencia a flexión máxima de los laminados fabricados a diferentes presiones.

Otro aspecto encontrado al analizar los resultados obtenidos es la mayor variabilidad (error relativo) del laminado fabricado a 20 psi, el cual también está relacionado con zonas sin humectación observadas a simple vista, ya que en los ensayos dos de las probetas analizadas y que estaban asociadas a estos defectos presentaron valores significativamente más bajos que las otras, un 27 % menor, que llevaron a dar esa variabilidad.

En la tabla 9 se aprecia la resistencia máxima a flexión de las alas del laminado tipo sándwich para las diferentes presiones analizadas, como era de esperarse los valores de resistencia máxima de alas son mayores a las del conjunto debido a que precisamente este material es el que aporta resistencia mecánica al sándwich. De otro lado se aprecia una diferencia más marcada a disminuir la resistencia al aumentar la presión de inyección en comparación con los laminados sándwich

Laminado	Resistencia a flexión de las alas σ_f (MPa)
8 psi	63,4 ± 2,6
13 psi	60,5 ± 2,2
20 psi	54,1 ± 6,4

Tabla 9. Resistencia a flexión máxima de las alas de los laminados fabricados a diferentes presiones.

En los ensayos a flexión con tres puntos realizados sobre todas las probetas se presentaron dos tipos de falla, una en la cual falla el laminado y otra en la cual falla el núcleo, sin embargo el modo de falla mas predominante en los ensayos fue la falla del núcleo, que luego de fracturarse provoca una delaminación o separación del laminado, como se aprecia en la figura 52.



Figura 52. Fallo por delaminación de las probetas sometidas a flexión.

Una de las probetas de la placa de 13 psi presentó una forma de fractura particular, como se aprecia en la imagen 53, en donde en el laminado superior de la probeta fallo por compresión, lo cual no es común que ocurra, ya que generalmente la zona más crítica a presentarse problemas es la zona inferior el cual está sometido a tracción, este fenómeno fue único en todos los ensayos realizados y fue provocado por una zona visible superior sin humectación.



Figura 53. Fallo de probeta de placa de 13 psi, debido a zona seca en la parte superior.

Para la placa de 20 psi se presentaban zonas sin humectación en la parte inferior, presentándose la falla en el laminado inferior, tal y como se aprecia en la figura 54, presentado el tipo fallo de forma opuesta a las obtenida en la placa 13 psi.



Figura 54. Fallo de probeta de placa de 20 psi, debido a zona de seca en la parte inferior.

6.6.2 Inspección previa a ensayos mecánicos

- Microscopía óptica

Este ensayo permitió evaluar el tipo y cantidad de defectos presentes a través del espesor de los laminados, en la figura 55 se aprecian las graficas de porosidad obtenidas para el laminado de 8 psi, a nivel general en las dos alas se muestran zonas de alta porosidad llegando a valores de 25 % en algunas regiones, que se muestran de color rojo. Para el ala superior del laminado (figura 55a) se observa que la mayor

concentración de porosidad se halla en el cuadrante superior derecho de la placa, y para el ala inferior (figura 55b) el mayor porcentaje se encuentra en el centro de la placa, que podría estar relacionado con que la parte central del laminado es la última en llenarse según la simulación en CFD. Otros de los defectos encontrados en esta placa por sus dos alas son las delaminaciones, ya que se observaron en varios puntos de la cuadrícula separaciones entre el laminado y el núcleo.

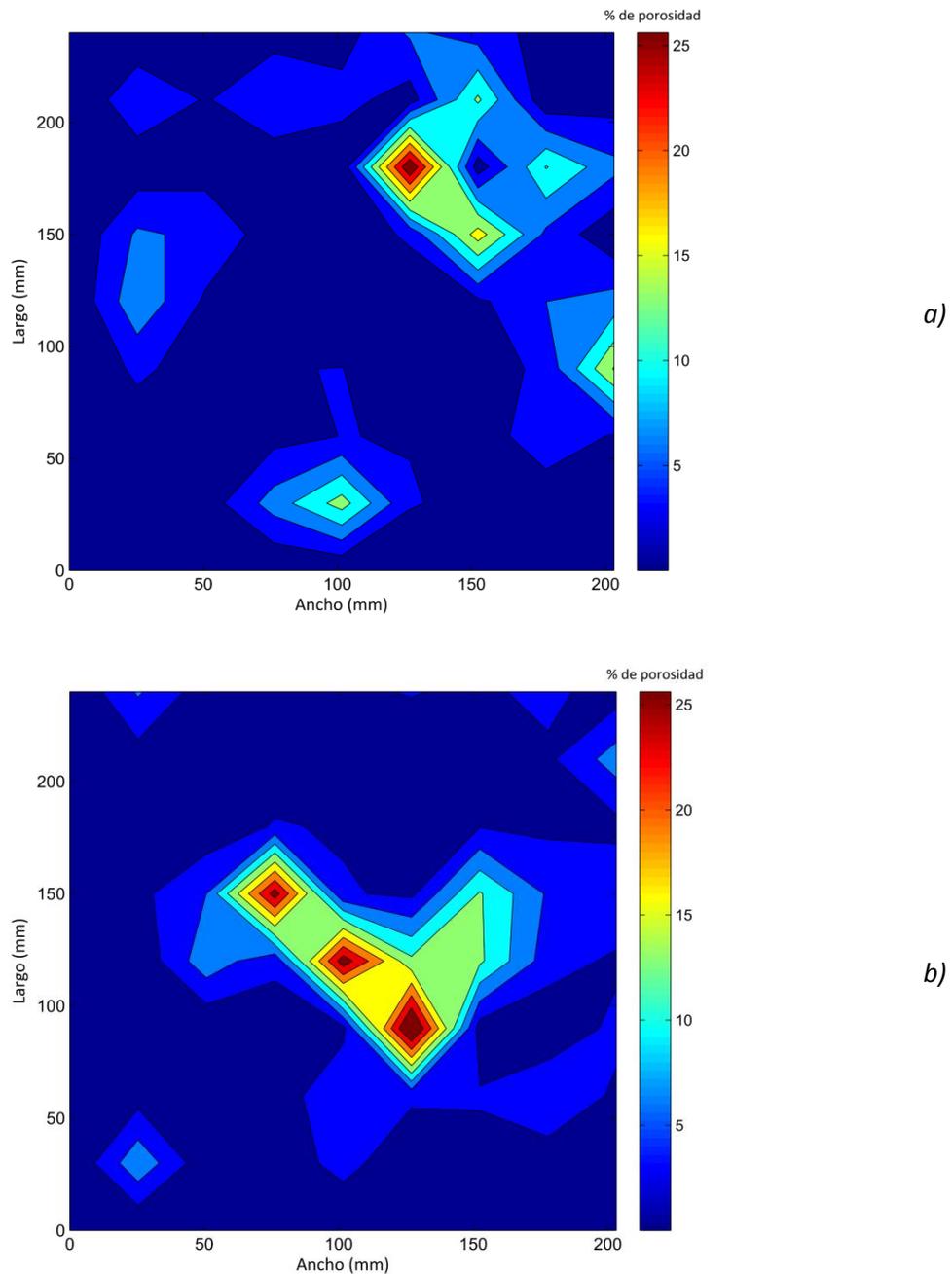


Figura 55. Representaciones graficas de las porosidades obtenidas en la placa de 8 PSI. *a)* Ala superior (salida resina en el molde) y *b)* Ala inferior.

La utilización de la microscopía óptica permitió observar la geometría de estos poros. En la figura 56 se muestra la forma de los defectos encontrados en la placa de 8 psi, los cuales son de forma elíptica y circulares, y en algunos casos irregulares. El tamaño de alguno era tan grande que se podían observar a simple vista.

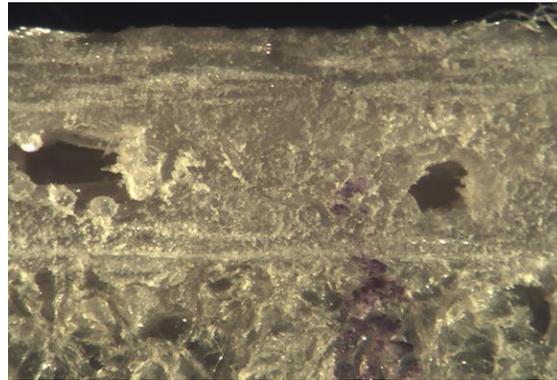


Figura 56. Fotografía de una de las alas de la placa inyectada a 8 PSI, donde se evidencia el tamaño y geometría de los poros encontrados.

En la placa inyectada a 13 psi se presentaron los menores valores de porosidad (menor al 4%) y la menor afectación en todo el área de las alas (ver figura 57). Presentándose particularmente una menor afectación en el ala inferior con más del 95% de la zona analizada libre de porosidad en comparación con el ala superior. Al igual que en la placa de 8 psi, también fueron encontradas las separaciones del núcleo y el laminado (delaminaciones), especialmente en la ala inferior.

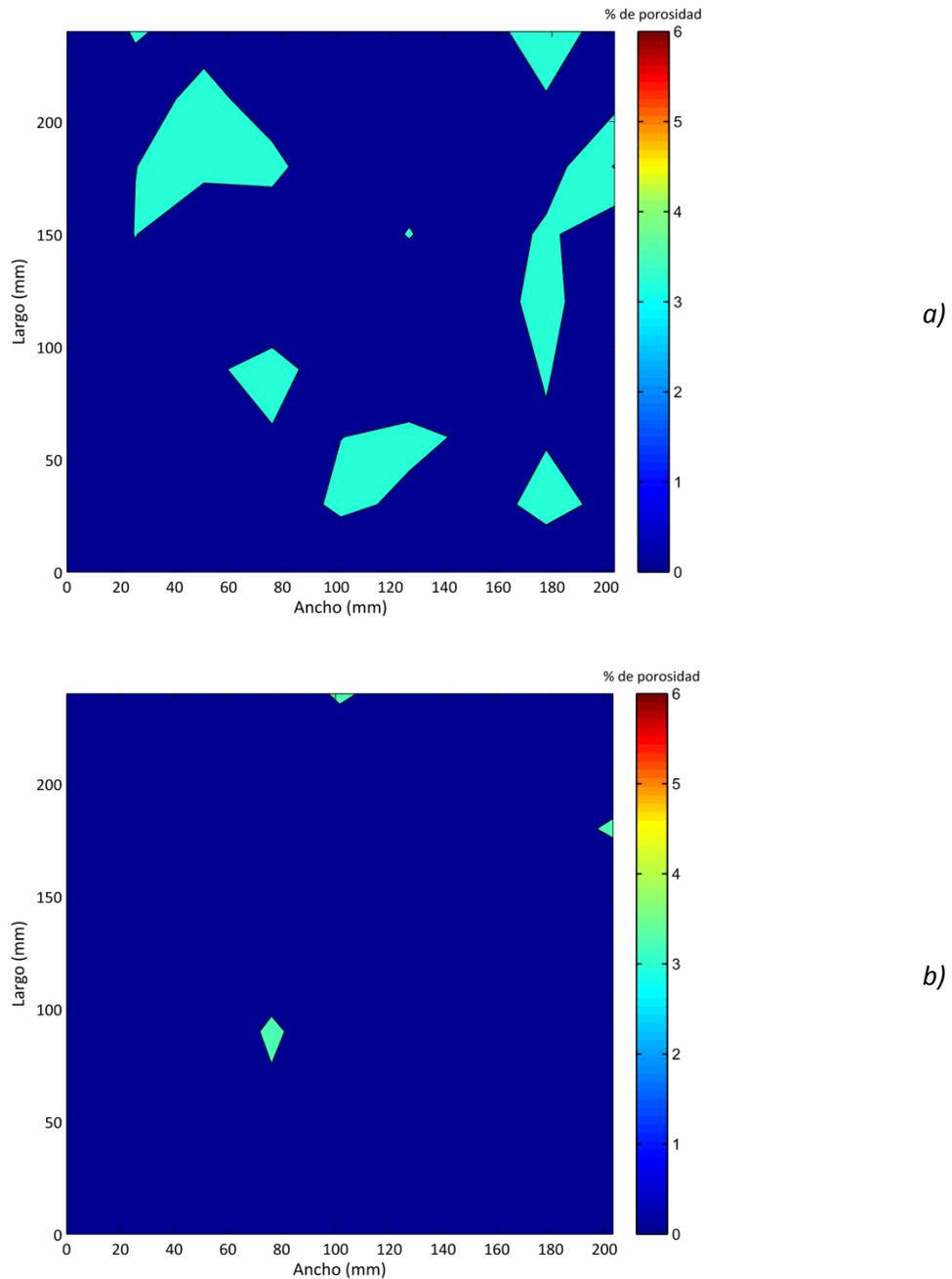


Figura 57. Representaciones graficas de las porosidades obtenidas en la placa de 13 PSI. *a)* Ala superior (salida resina en el molde) y *b)* Ala inferior.

En esta placa de 13 psi se encontraron zonas con gran cantidad de poros circulares, pero de tamaños muy pequeños, como se aprecia en la figura 58. Un fenómeno similar de pequeños poros ha sido descrito por Hamidi et al.⁶⁶ en su estudio de la morfología en laminados fabricados por RTM, en donde encuentra que a bajas velocidades del

frente de flujo se atrapan vacíos más pequeños, pero en ciertas regiones cercanas a la superficie y al puerto de inyección encontró defectos más elípticos e irregulares.

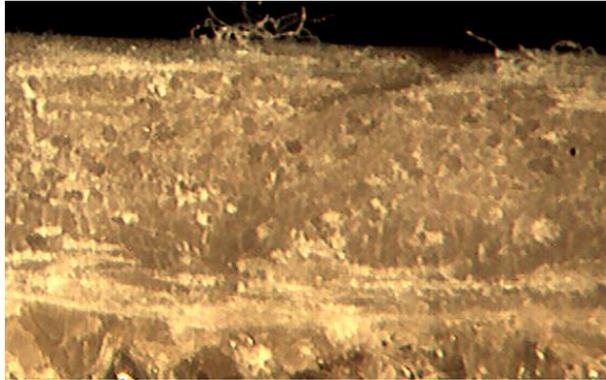


Figura 58. Fotografía de la cantidad de poros encontrados en la lamina de 13 psi.

En la figura 59 se muestran las gráficas obtenidas para la placa de 20 psi, en donde se muestran valores altos de porosidad en el ala superior solo en un punto específico del laminado, y para el ala inferior de la placa en cambio se muestran este tipo de puntos. Esta ala superior presentó el valor más alto de porosidad registrado (mayor a un 25%) comparadas con el resto de alas, como podría esperarse en principio, dada la mayor velocidad del frente de flujo, pues la resina no alcanza a impregnar totalmente los refuerzos dejando así, una mayor área vacía, es decir, poros grandes.

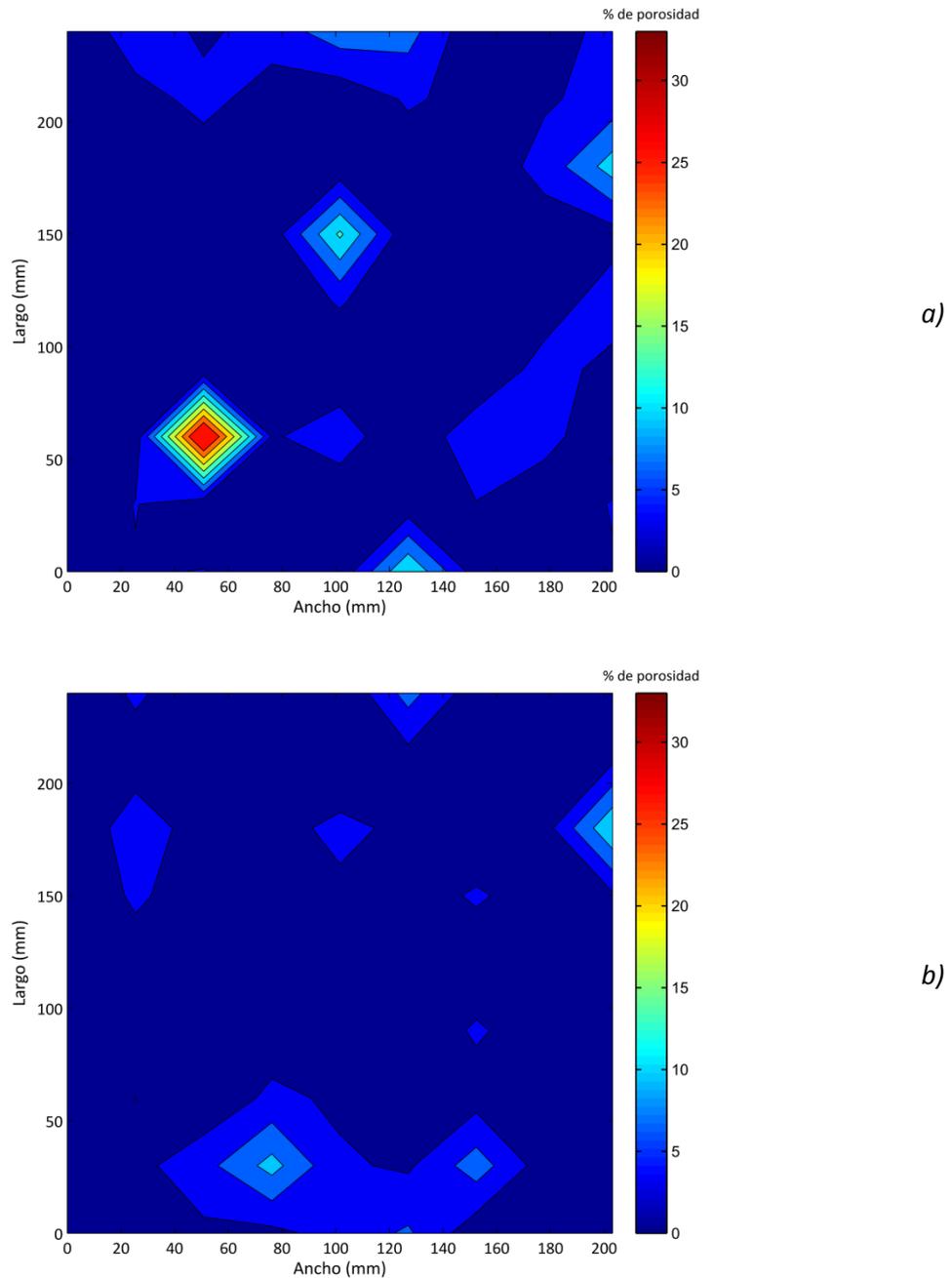


Figura 59. Representaciones graficas de las porosidades obtenidas en la placa de 20 PSI. *a)* Ala superior (salida resina en el molde) y *b)* Ala inferior.

En los puntos analizados para la placa de 20 psi no fueron encontrados delaminaciones, lo que contrasta con los resultados obtenidos en las placas de 8 y 13 psi, en las cuales fue común encontrar dichas delaminaciones. Este fenómeno puede llevar a pensar que a presiones más altas se logra una mejor humectación de la resina al núcleo, pero hay una mayor tendencia a formar zonas sin humectación o de alta

porosidad, como era apreciable a simple vista y corroborado por el valor más alto de porosidad encontrado en la gráfica de la porosidad del laminado fabricado a 20 psi, y estos defectos en combinación tienen un efecto importante en la resistencia a la flexión, ya que esta placa presentó el menor valor en esta propiedad.

De manera general, los laminados fabricados a 13 psi presentaron la tendencia a mostrar en sus alas un menor nivel de porosidad y una menor afectación del área, mientras que el laminado de 8 psi presentó la mayor afectación y niveles de porosidades elevados, por lo que no se puede establecer una relación entre la presión de inyección y los resultados obtenidos de porosidad.

En la figura 60 se muestra la porosidad promedio en cada ala del laminado para las diferentes presiones de fabricación, se observa una tendencia en la que las alas inferiores de los laminados presentan un menor porcentaje de porosidad, aunque las porosidades para las dos alas de la placa de 8 psi fueron prácticamente equivalentes. Al comparar los porcentajes de porosidad promedio no se observa una relación directa con los resultados obtenidos en la caracterización mecánica, ya que se aprecia que los laminados con los valores más altos de resistencia a la flexión (8 y 13 psi) presentan el mayor y menor porcentaje de porosidad, lo que lleva a pensar que más importante que el porcentaje de porosidad es la forma en cómo estén distribuidos dichos poros o defectos, ya que si hay mucha porosidad pero están distribuidos uniformemente en todo el laminado se obtienen buenas propiedades (placa de 8 psi), caso contrario es que si hay cierta agrupación de los poros en ciertas regiones tienen un efecto más adverso en el comportamiento mecánico, como se obtuvo en la placa de 20 psi.

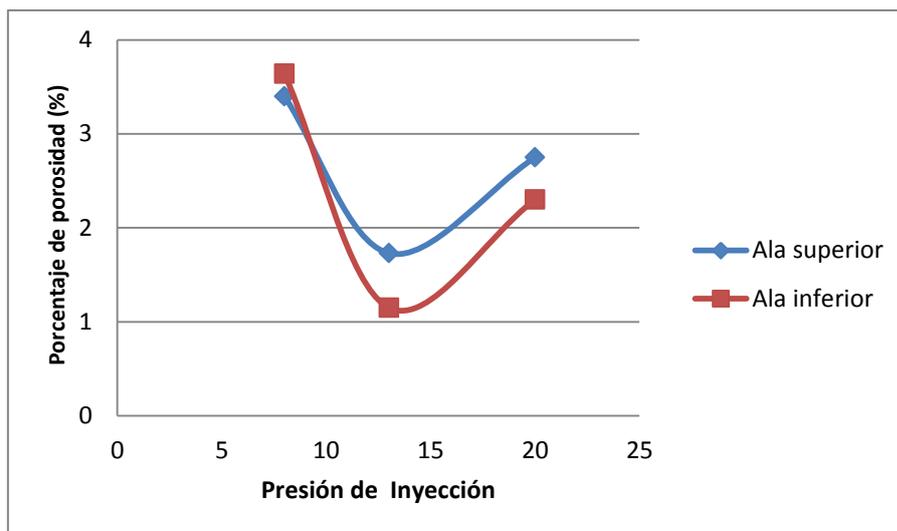


Figura 60. Grafica de porosidad vs presión de inyección por caras superior e inferior.

- Termografía infrarroja

Las imágenes termográficas realizadas sobre cada uno de los laminados que se muestran a continuación especifican el punto de máxima temperatura al momento de la fotografía y una isoterma que corresponde a puntos o áreas negras en el termograma. De acuerdo con los resultados encontrados al realizar ensayos termograficos sobre placas de prueba se determinó que las zonas donde hay una temperatura menor al resto de la placa o hay una acumulación de puntos negros están relacionados con falta de humectación o un nivel de porosidad alto y zonas en las que hay un aumento de temperatura en la placa denotan una delaminación.

En la figura 61 se pueden apreciar las termografías de la placa inyectada a una presión de 8 psi, en donde se aprecian áreas o puntos negros que presentan una baja temperatura con respecto al resto de la placa, y denotan una alta porosidad en esas zonas, pero con un tamaño de poros pequeños e internos, ya que visualmente no era notorio. Particularmente en el ala superior de este laminado (figura 61a) se presenta una zona de alta temperatura en el borde izquierdo de la imagen (zona roja) que se trata de una zona con delaminación o falta de unión del núcleo con el laminado, ya que este fenómeno también fue detectado en ensayos de microscopía óptica para esa placa y la forma en que se presenta concuerda con los resultados obtenidos en los ensayos preliminares sobre la placa de prueba.

Adicionalmente, Dattoma et al.⁶³ en su investigación encontraron que la delaminación en plásticos reforzados tipo sándwich con núcleo de espuma de PVC se presentaban a una temperatura más elevada que el resto de la área del laminado en termografías realizadas, debido a que este aire atrapado debajo en el laminado presenta un bajo coeficiente de conducción térmica, y este no permite el flujo de calor hacia el interior del laminado durante el calentamiento, provocando que esta temperatura se concentre en la superficie.

En el ala inferior de la placa inyectada a 8 psi (figura 61b), se pueden notar puntos negros ubicados hacia los bordes de la placa, que registran algo de porosidad en esa zona de la placa, y el área cercana al punto de máxima temperatura (32 °C) es notorio afectación por delaminación.

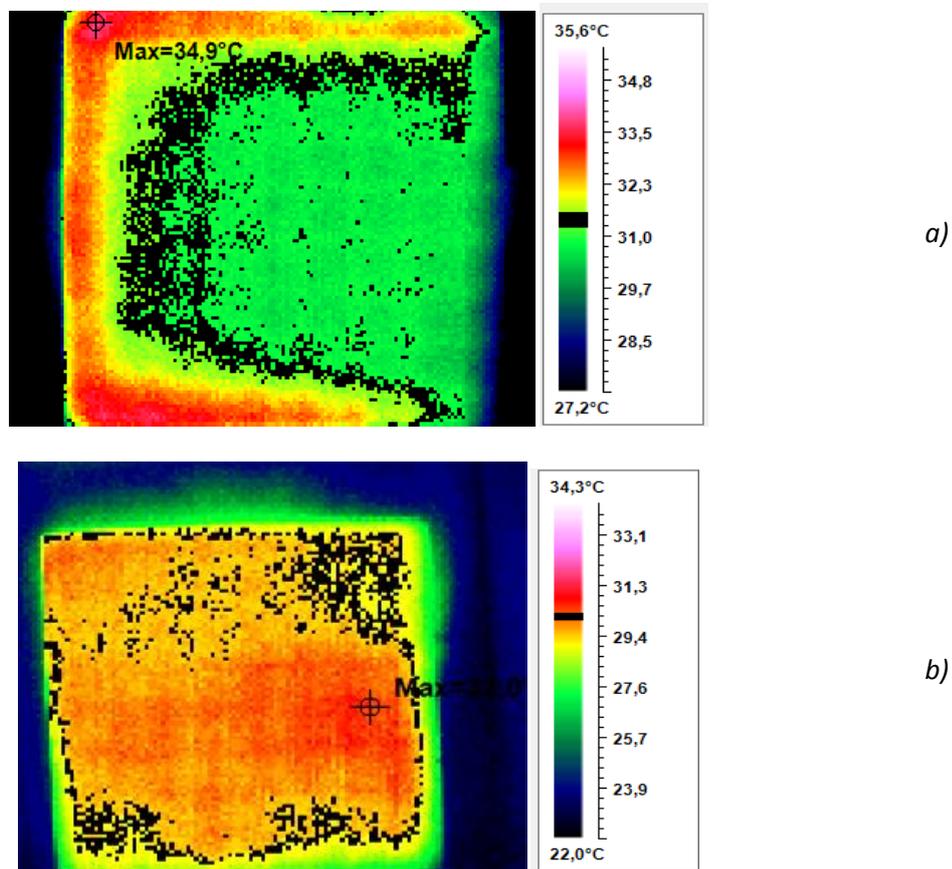


Figura 61. Termografías de la placa inyectada a 8 PSI. a) Ala superior (salida resina en el molde) y b) Ala inferior.

En la figura 62 se muestran los termogramas de la placa inyectada a 13 psi, en el ala superior (figura 62a) se evidencia un defecto considerable que se encuentra cercano al punto de salida de resina, que está rodeado por los puntos negros de la isoterma. Este

defecto corresponde a una falta de humectación, que incluso era visible al inspeccionar la placa visualmente, y que precisamente corresponde a la última área de llenado del proceso según la simulación por CFD. Esta zona con falta de humectación en la zona superior propició el tipo de fractura que se mostró en la figura 53, en donde el laminado del ala superior falló.

En la zona inferior de esta placa se encuentra una zona de alta temperatura que contrasta con el resto del laminado (ver figura 62b), que está referida a una falta de humectación del núcleo (delaminación), ya que los resultados obtenidos al realizar la microscopía óptica lo confirmaron. De otro lado, la geometría de esta posible delaminación presenta una similitud en la forma como ingresó la resina durante el llenado del molde según la simulación en CFD (figura 29), por lo que podría ser algún efecto del diseño en la falta de unión entre el laminado y el núcleo.

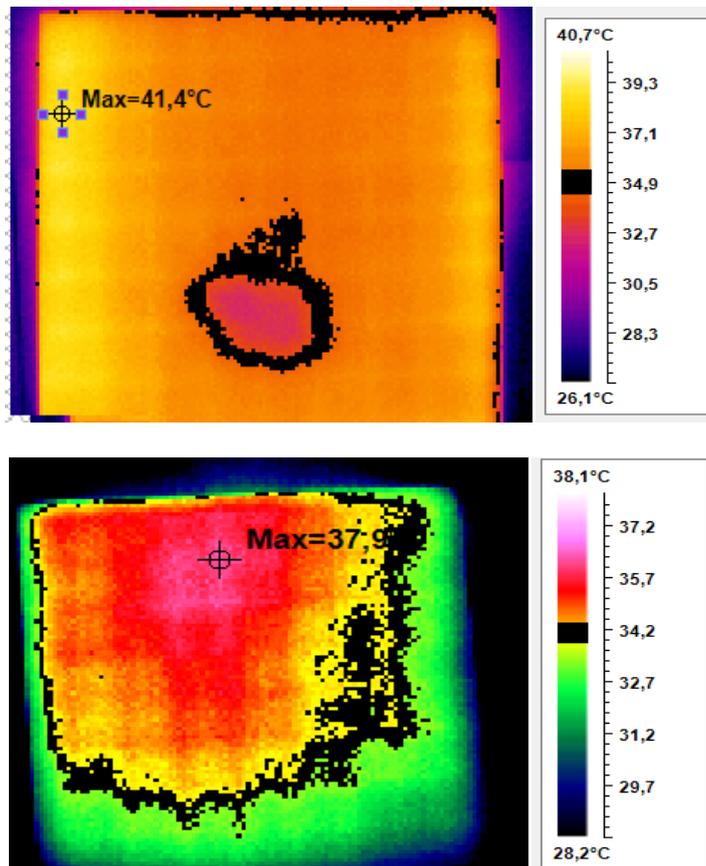


Figura 62. Termografías de la placa inyectada a 13 psi. *a)* Ala superior (salida resina en el molde) y *b)* Ala inferior.

Las termografías para el laminado inyectado a 20 psi se pueden apreciar en la figura 63, a nivel general se ve un color predominante para ambas alas (rojo), que confirma la ausencia de delaminaciones, verificadas con los ensayos de microscopía óptica. Esta característica es una buena indicación de un buen procesamiento en lo referente a unión del sándwich al laminado. Para el ala inferior (figura 63b) se aprecian dos zonas de color negro (isoterma) que está relacionada con falta humectación, ya que a simple vista eran claramente identificables. En la parte superior de esta placa (Figura 63a) se muestra un defecto central inferior similar al de la cara inferior, que igualmente era apreciable a simple vista, pero en el costado derecho estas zonas negras estaban más distribuidas hacia un costado de la placa, que podría definir una zona de alta porosidad.

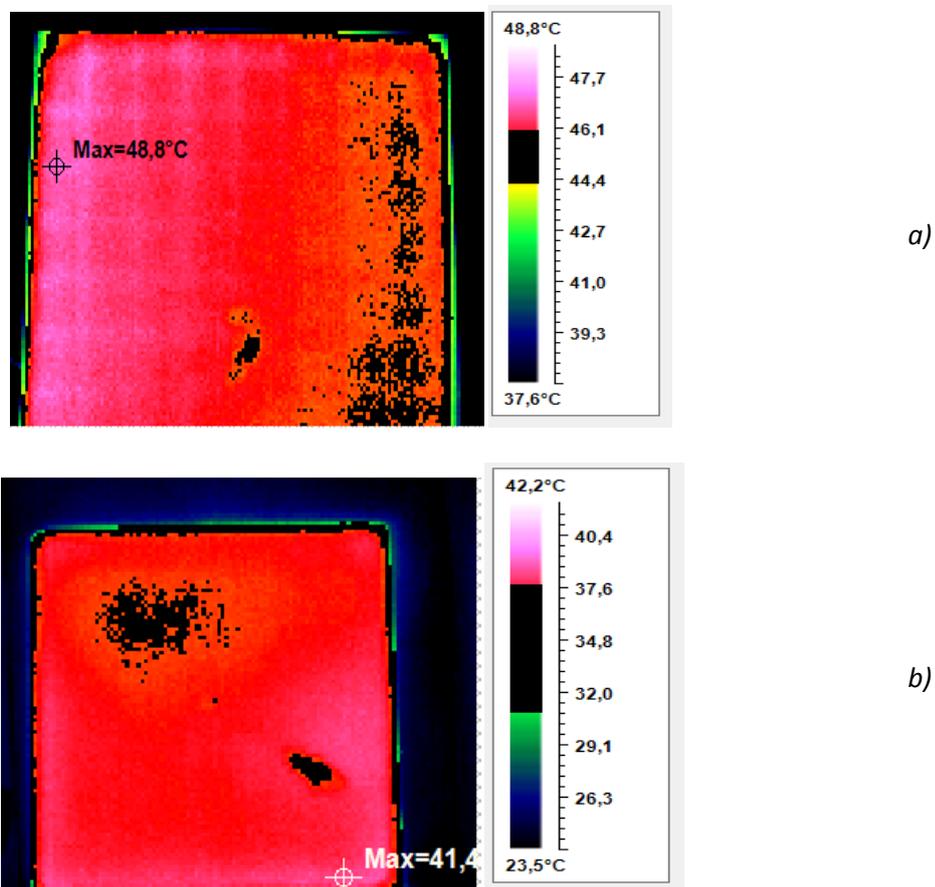


Figura 63. Termografías de de la placa inyectada a 20 psi. *a)* Ala superior (salida resina en el molde) y *b)* Ala inferior.

Al realizar una comparación de las imágenes obtenidas en la termografía con las gráficas construidas de los datos de microscopía óptica, hay coincidencia en cuanto a identificación de delaminaciones pero no hay una consistencia clara entre los demás

defectos encontrados como era de esperarse, ya que las escalas de medición para ambos ensayos son diferentes. Para el caso de la termografía, la identificación de defectos está afectada por el tamaño y profundidad de los mismos, como lo encontró Krell et al.⁶⁴ en su estudio de termografía sobre laminados planos, y básicamente defectos circulares de 5 mm de diámetro y a una profundidad de 5 mm no eran visibles; que difiere de manera importante con la escala de tamaños de los defectos encontrados en los ensayos de microscopía óptica de este estudio.

De otro lado las imágenes termográficas obtenidas podrían servir para establecer detrimento de propiedades mecánicas en servicio o fallas en funcionamiento de material similar en una pieza real si son analizadas por un técnico experto, ya que fue posible detectar zonas secas, con alta porosidad, en cada una de las placas analizadas, y si se conocen de antemano las consecuencias de estos defectos en alguna propiedad específica o el rendimiento de la pieza, puede servir para evitar una falla. Por lo que del análisis de las termografías mostradas, un ojo experto pudo haber concluido que las propiedades de resistencia a la flexión podría ser menores en la placa de 20 psi comparadas con las otras, si se conocía de antemano el efecto de las zonas sin humectación que es más crítico que las porosidades dispersas o delaminaciones, conclusión que no podría ser llevada a cabo con solo el análisis de los mapas construidos con la microscopía óptica realizados, situación que refleja la utilidad de esta técnica no destructiva.

6.6.3 Pasos para la detección defectos en materiales tipo sándwich mediante termografía IR

Con base en los resultados obtenidos en la caracterización termográfica de los laminados tipo sándwich analizados en este estudio, a continuación se describen recomendaciones y los pasos a seguir para la inspección termográfica de este tipo de material compuesto.

El procedimiento para la inspección es el siguiente:

- a) *Elaboración de un laminado de calibración:* La fabricación de laminados con defectos inducidos o artificiales conocidos permite interpretar la respuesta térmica de estos, y así la indicación que estos generan en la imagen termográfica. Por otro lado, la utilización de los mismos materiales para la fabricación del laminado de calibración con características iguales a los que

se utilizaran en las piezas reales que se fabricarán también facilita la identificación en el proceso.

- b) *Preparación de la superficie de inspección:* Si las superficies de la pieza a analizar presenta un acabado brillante, es recomendable matizar las superficies para mejorar la resolución de la cámara mediante la utilización de una capa delgada de color mate.

- c) *Adecuación del área de prueba:* es de gran ayuda que el lugar en donde serán realizados los ensayos termográficos no esté expuesto a fuentes importante de radiación. Si el tamaño de la pieza lo posibilita, es recomendable introducir la pieza a analizar en un lugar que aislé la radiación, como lo puede ser una caja de cartón.

- d) *Acondicionamiento térmico de la pieza:* Es parte importante lograr que a la pieza a analizar se le aplique temperatura de manera uniforme, por lo que es común la utilización de lámparas flash de alta potencia para garantizar la misma cantidad de radiación. Si hay la posibilidad de calentar el laminado u objeto dentro del molde se debe dejar un tiempo suficiente. La temperatura no es una variable clave, y está más relacionada con la calidad y resolución del equipo de medición.

- e) *Toma de termografías:* Se toman varios termogramas espaciados un período de tiempo debido a que en algunas ocasiones no son claramente visibles los defectos y puede ser recomendable la resta de imágenes para obtener un mayor detalle. para este tipo de material y cámara utilizada, de 6 a 8 fotografías térmicas en un intervalo de 30 segundos presentó buenos resultados.

- f) *Tratamiento de imágenes:* Existen programas para el análisis de imágenes termograficas como IrAnalyser®, Flir® y Avio (NEC) NS9500, que ayudan a mejorar la identificación de defectos pequeños o poco visibles, pero grandes delaminaciones y falta de humectación son fácilmente identificables si se realizan las recomendaciones mencionadas.

6.7 CONCLUSIONES

El software de dinámica de fluidos computacional *FLOW-3D* es una buena herramienta para la construcción de moldes para RTM. A pesar de no ser un software especializado para el moldeo líquido de materiales compuestos, presentando algunas desviaciones u omisiones, permite observar preliminarmente el comportamiento del frente de flujo antes de la construcción del molde para así poder predecir puntos críticos o posibles zonas secas, para realizar modificaciones en el diseño que permitan corregirlas.

La variación en la presión de inyección en la fabricación de laminados tipo sándwich por RTM tiene un efecto notable en la aparición de defectos o discontinuidades en este tipo de materiales, y por ende en las propiedades mecánicas finales de estos, por lo que es de vital importancia en la fabricación a nivel industrial de piezas en materiales similares encontrar el valor de presión o rango de presión en donde se obtengan las mejores características morfológicas para lograr las prestaciones mecánicas ideales.

La caracterización morfológica por medio de termografía infrarroja es una buena herramienta para la identificación de defectos macro en piezas o laminados tipo sándwich, en especial delaminaciones y zonas secas como las presentes en las placas obtenidas en este estudio. La limitante de esta técnica es la necesidad de la realización de ensayos preliminares sobre placas de calibración con defectos conocidos para poder tener resultados confiables, especialmente si no se tiene experiencia suficiente en la realización de este tipo de ensayos.

Al analizar los resultados obtenidos del análisis morfológico y la resistencia a flexión en los diferentes laminados fabricados se encontró que zonas sin humectación o secas tienen una mayor incidencia en la disminución de la resistencia a flexión máxima del material tipo sándwich, en comparación con otros tipos de defectos como alta porosidad o delaminación que aunque disminuyen el valor de esta propiedad mecánica, no es tan notorio como los ocasionados por las zonas secas.

En la fabricación por RTM de laminados tipo sándwich bajo las condiciones, materiales y equipos descritos en este estudio no fue posible la obtención de una placa libre de

defectos, pero la inyección realizada a 20 psi presenta las mejores características, ya que fue la única placa en donde no se presentaron delaminaciones, y las zonas secas podrían haber disminuido considerablemente con la ayuda de la aplicación de vacío en la salida de resina, ya que es bien conocido por expertos en esta técnica que la asistencia de vacío ha sido una solución a este tipo de defectos.

7 CONCLUSIONES

Los valores de permeabilidad de los refuerzos o telas obtenidos en este estudio presentan una buena concordancia con los valores reportados por otros investigadores, por lo que se puede llegar a concluir que el método propuesto para la medición de la permeabilidad y los cálculos utilizados mediante la ley de *Darcy* si guardan coherencia, y pueden ser utilizados para estudios posteriores de permeabilidad sobre otros refuerzos.

En este estudio se reportan valores de permeabilidad para un refuerzo especial para RTM llamado manta moldeable que comúnmente es empleado para la fabricación de piezas de carácter ornamental en Colombia, y del cual no hay disponible información sobre sus características de flujo, a pesar de ser comúnmente utilizado en procesos de moldeo líquido cerrado. Estos valores encontrados pueden ayudar a la industria nacional a la hora de empezar a involucrar herramientas de simulación a sus procesos de diseño de moldes complejos.

El refuerzo Mat núcleo mostró durante los ensayos realizados un buen comportamiento, debido a que fue fácil obtener un llenado rápido y completo del molde, esta particularidad ha propiciado que sea uno de los refuerzos preferidos de la incipiente industria de RTM en Colombia, ya que sin el uso de herramientas de simulación numérica para la fabricación de moldes y la asistencia por vacío del mismo se pueden obtener piezas con pocos defectos en un tiempo aceptable de producción. De otro lado las telas Mat y Woven analizadas en este estudio y que normalmente se utilizan para procesos de laminación manual presentaron un comportamiento irregular y asimétrico de los frentes de flujo, por lo que es factible que su utilización en RTM produzca problemas como zonas secas o sin humectación, si no se utilizan herramientas de simulación adecuadas.

En la tela tejida bidireccional (Woven) se obtuvieron valores de permeabilidad algo alejados de los reportados por otros investigadores, lo que hace necesario un análisis más riguroso sobre efecto de las condiciones particulares utilizadas como el líquido permeante, método de inyección y características de compresibilidad en los resultados descritos en este estudio; al igual que las posibles desviaciones en los valores de permeabilidad obtenidos por la utilización de Ley de *Darcy*, ya que es conocido que

esta ley presenta desviaciones bajo ciertas condiciones de porosidad y velocidades de frente de flujo, que podría estar influyendo en la disparidad descrita anteriormente.

Los programas de CFD utilizados en este estudio para simular los experimentos de permeabilidad realizados, no muestran una suficiente consistencia en los resultados que hagan pensar que puedan ser utilizados sin mayores ajustes en la simulación del llenado de moldes en métodos de moldeo líquido en materiales compuestos de matriz de polimérica, aunque los resultados arrojados por *Flow 3D* muestran que hay una mayor coherencia que los obtenidos en *Ansys*, especialmente para el refuerzo Mat núcleo que mostró una aceptable precisión. Adicionalmente, es factible que con ajustes en el modelo matemático de *Flow 3D* se pueda mejorar la correlación entre la simulación y los resultados reales de este software para los refuerzos que tienen morfologías difíciles de representar matemáticamente, como las telas tejidas.

Es evidente que la obtención de buenos resultados en simulaciones de llenado en moldes para RTM y otras técnicas similares no solamente está influenciado por emplear unos correctos y reales valores de permeabilidad, ya que para obtener una buena precisión es requerido adicionalmente un software especializado que considere factores especiales en el reforzamiento como orientación de fibras y geometría de canales.

El software de dinámica de fluidos computacional *FLOW-3D* es una buena herramienta para la construcción de moldes para RTM. A pesar de no ser un software especializado para el moldeo líquido de materiales compuestos, presentando algunas desviaciones u omisiones, permite observar preliminarmente el comportamiento del frente de flujo antes de la construcción del molde para así poder predecir puntos críticos o posibles zonas secas, para realizar modificaciones en el diseño que permitan corregirlas.

La variación en la presión de inyección en la fabricación de laminados tipo sándwich por RTM tiene un efecto notable en la aparición de defectos o discontinuidades en este tipo de materiales, y por ende en las propiedades mecánicas finales de estos, por lo que es de vital importancia en la fabricación a nivel industrial de piezas en materiales similares encontrar el valor de presión o rango de presión en donde se obtengan las mejores características morfológicas para lograr las prestaciones mecánicas ideales.

La caracterización morfológica por medio de termografía infrarroja es una buena herramienta para la identificación de defectos macro en piezas o laminados tipo sándwich, en especial delaminaciones y zonas secas como las presentes en las placas obtenidas en este estudio. La limitante de esta técnica es la necesidad de la realización de ensayos preliminares sobre placas de calibración con defectos conocidos para poder tener resultados confiables, especialmente si no se tiene experiencia suficiente en la realización de este tipo de ensayos.

Al analizar los resultados obtenidos del análisis morfológico y la resistencia a flexión en los diferentes laminados fabricados se encontró que zonas sin humectación o secas tienen una mayor incidencia en la disminución de la resistencia a flexión máxima del material tipo sándwich, en comparación con otros tipos de defectos como alta porosidad o delaminación que aunque disminuyen el valor de esta propiedad mecánica, no es tan notorio como los ocasionados por las zonas secas.

En la fabricación por RTM de laminados tipo sándwich bajo las condiciones, materiales y equipos descritos en este estudio no fue posible la obtención de una placa libre de defectos, pero la inyección realizada a 20 psi presenta las mejores características, ya que fue la única placa en donde no se presentaron delaminaciones, y las zonas secas podrían haber disminuido considerablemente con la ayuda de la aplicación de vacío en la salida de resina, ya que es bien conocido por expertos en esta técnica que la asistencia de vacío ha sido una solución a este tipo de defectos.

8 BIBLIOGRAFÍA

- ¹ <http://www.ossur.com/?PageID=13462>
- ² Askeland, D. Ciencia e ingeniería de los materiales. Thompson. Cuarta edición. 2004.
- ³ Sanchez, F. A process performance index based on gate-distance and incubation time for the optimization of gate locations in liquid composite molding processes. Composites: Part A, Vol. 37 (2006), p. 903–912
- ⁴ <http://www.esi-group.com/products/composites-plastics/pam-rtm/>
- ⁵ Miravete, A. Materiales compuestos. Tomo I y II. INO reproducciones. 2000.
- ⁶ <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/CompositeSandwich.png>
- ⁷ Warrior, N. A. Effect of resin properties and processing parameters on crash energy absorbing composite structures made by RTM. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2003.
- ⁸ Potter, K. Resin transfer moulding. Chapman & Hall. 1997. p 48 -49.
- ⁹ http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/RTM_process.png
- ¹⁰ Rudd, C. ASM Handbook composites. Volume 21. 2001.
- ¹¹ Schettle, T. Generations at Risk: Reproductive Health and the Environment. Massachusetts institute of thechnology. 1999.
- ¹² Kruckenberg, T. M. Resin transfer moulding for aerospace structures. Kluwer academic publishers. 1998.
- ¹³ Tong, L. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites. El sevier. 2002. P 48.
- ¹⁴ De La Caba, K. Influencia de la temperatura de curado y del contenido de modificador en la conducta de curado y en las propiedades de resinas de poliéster insaturadas con diversas composiciones. Tesis de doctorado en ciencias químicas. San Sebastián. 1997.
- ¹⁵ Palardy, G. Optimization of RTM processing parameters for Class A surface finish. Composites: Part B 39 (2008) 1280–1286.

- ¹⁶ http://www.lantor.nl/index.php/id_structuur/10599/soric.html
- ¹⁷ <http://www.easycomposites.co.uk/products/core-materials/lantor-soric-SF-3mm.aspx>
- ¹⁸ Rosato, D. Reinforced plastics handbook. Elsevier Ltda. 2004.
- ¹⁹ http://www.ocvreinforcements.com/pdf/products/UNIFILO_Multiconform_ww_03_2009_Rev2.pdf
- ²⁰ http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/imac_pro_en.htm
- ²¹ <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353804001642>
- ²² Campbell, F. Manufacturing Processes For Advanced Composites. El sevier (2004).
- ²³ Hua, T. Variations in unsaturated flow with flow direction in resin transfer molding: An experimental investigation. Composites parte A. 2007. vol. 38. P 1872-1892.
- ²⁴ Palardy, G. Optimization of RTM processing parameters for Class A surface finish. Composites: Part B 39 (2008). P 1280–1286.
- ²⁵ Nieri, P. Cost-effective high-performance solutions for automotive body panels. JEC composites magazine. N° 45. Noviembre-diciembre 2008.
- ²⁶ Werner, C. Double-diffusive fingering in porous media. The Florida State University (2007).
- ²⁷ Scheidegger, A. The physics of flow through porous media. University of Toronto; 1974.
- ²⁸ Kaviany, M. Principles of heat transfer in porous media. Springer; 1995.
- ²⁹ Allan, F; Kamel, M; Mughrabi, T and Hamdan, M. Infiltration of oil into porous sediments, Appl. Math. Comput. 177 (2) (2006). P 659–664.
- ³⁰ Sadegh Zadeh, K. Multi-scale Inverse Modeling in Biological Mass Transport Processes, Ph.D. Thesis, Fischell Department of Bioengineering, University of Maryland at College Park, 2006.
- ³¹ Sadegh Zadeh, K. Parameter estimation in flow through partially saturated porous materials, J. Comput. Phys. 227 (24) (2008). P 10243–10262.
- ³² Navarini, L; Nobile, E; Pinto, F; Scheri, A and Suggi-Liveran, F. Experimental Investigation of Steam Pressure Coffee Extraction in a Stove-top Coffee Maker. Applied Thermal Engineering (2008).

- ³³ Shende, A; Johnson, J; Yang, S; Bagley, S and Thalagavara, A. The filtration and particulate matter oxidation characteristics of a catalyzed wall-flow diesel particulate filter : Experimental and 1-D 2-layer model results. SAE transactions. 2005, vol. 114, no 4. P 1878.
- ³⁴ Weitzenbock, J; Shenoi, and Wilson, P. "Radial flow permeability measurement. Part A: Theory" Composites: Part A. vol 30 (1999), P 781–796.
- ³⁵ Lekakou, C; Johari, M; Norman, D and Bader, M. Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding. Composites: Part A. vol 27A (1996), P 401-408.
- ³⁶ Han, K; Lee, C and Rice, B. Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. Composites Science and Technology 60 (2000). P 2435-2441.
- ³⁷ Chiu, C. H. In-Plane Permeability of Stitched MMWK Laminates in Resin Transfer Molding. 391 Journal of Reinforced Plastics and Composites(2002) 21; P 391
- ³⁸ Cho, Y; Song, Y; Kang, T, Chung, K and Youn, J. "Permeability Measurement of a Circular Braided Preform for Resin Transfer Molding"; Fibers and Polymers, Vol.4 (2003), P 135-144.
- ³⁹ Hoes, K; Dinescu, D; Sol, H; Vanheule, M; Parnas, R; Luo, Y and Verpoest, I. New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM. Composites science and technology. Vol 60 (2000), P 2435-2441.
- ⁴⁰ Golestanian, H. Experimental determination of preform permeability variation with porosity for woven fiberglass and carbon mats. 13th International Conference on Experimental Mechanics. July 1 2007.
- ⁴¹ Pomeroy, R; Grove, S; Summerscales, J; Wang, Y and Harper, A. Preform Characterisation for Resin Transfer Moulding"; Composites Processing Association Limited. April 2006.
- ⁴² Ding, L; Shih, C; Liang, Z; Zhang, C and Wang, B. In situ measurement and monitoring of whole-field permeability profile of fiber preform for liquid composite molding processes; Composites: Part A, Vol 34 (2003), P 779–789.

- ⁴³ Hayward, J and Harris, B. "Effect of process variables on the quality of RTM mouldings"; *Sampe Journal*, Vol 26 (1990), P 39-46.
- ⁴⁴ Nield, D and Bejan, A. *Convection in porous media*. Springer. 2006. P 6.
- ⁴⁵ Chai, Z; Shi, B; Lu, J and Guo, Z. Non-Darcy flow in disordered porous media: A lattice Boltzmann study. *Computers & Fluids*. 39 (2010). P 2069–2077.
- ⁴⁶ Schell, J; Siegrist, M and Ermanni, P. Experimental Determination of the Transversal and Longitudinal Fibre Bundle Permeability. *Appl Compos Mater* (2007). 14. P 117–128.
- ⁴⁷ Potter, M and Wiggert, D. *Mecánica de fluidos*. Thomson. 3 edición (2001).
- ⁴⁸ http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf
- ⁴⁹ <http://www.esi-group.com/products/composites-plastics/pam-rtm>
- ⁵⁰ <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4186/1/MEMORIA%20CFD.pdf>
- ⁵¹ Wu, X; Li, J and Ajit Sheno, R. Measurement of braided preform permeability. *Composites Science and Technology* (2006). 66: 3064–3069.
- ⁵² Amico, s and Lekakou, c. an experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding. *composites science and technology* 61 (2001) P 1945–1959.
- ⁵³ Visconti, I; Langella, A and Durante, M. The influence of injection pressure on the permeability of unidirectional fibre preforms in RTM. In: 8th European Conference on Composite Materials, ECCM-8, 3–6 June 1998, Naples, Italy. p. 737–43.
- ⁵⁴ Gauvin, R; Trochu, F; Lemenn, Y and Diallo, L. Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement. *Polymer Composites* 1996;17(1) p 34–42.
- ⁵⁵ Griffin, P; Grove, S; Russell, P; Short, D; Summerscales, J; Guild, F and Taylor, E. The effect of reinforcement architecture on the long-range flow in fibrous reinforcement. *Composites Manufacturing* 1995;6(3-4):221–35.

⁵⁶ Ahn, K; Seferis, J and Berg, J. Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements. *Polymer Composites*. (12) 1991. P 146–152.

⁵⁷ Comas-Cardona, S; Zhang, F; Bickerton, S; Tournier, L; Gan, J and Binetruy, C. Fiber reinforcements: correlating permeability and local spatial fibrous features. 18th international conference on composite materials.

⁵⁸ Endruweit, A; Harper, L; Turner, T; Warrior, N and Long, A. The permeability of random discontinuous carbon fibre preforms. School of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, University of Nottingham, University Park, Nottingham, NG7 2RD, U.K.

⁵⁹ <http://easycomposites.co.uk/products/core-materials/coremat-5mm.aspx>

⁶⁰ <http://mv.dmocho.one.pl/attachments/RTM%20accessories.pdf>

⁶¹ http://www.diabgroup.com/americas/u_products/u_divinycell_h.html

⁶² <http://www.saveonfiberglass.com/View/12-Divinycell-GSW-H-80>

⁶³ Dattoma, V; Marcuccio, R; Pappalettere, C and Smith, G. Thermographic investigation of sandwich structure made of composite material. *NDT & E International*. 34 (2001), P 515–520.

⁶⁴ Krell, T; Brandenburg, R and Lauterborn, E. Comparative Investigation of Pulse Thermographic and Shearographic Testing of Composite Materials. 9th European NDT Conference (ECNDT) September, 25-29, 2006 - Berlin, Germany.

⁶⁵ <http://www.guideinfrared.es/a1-thermography-camera.html>

⁶⁶ Hamidi, Y and Altan, M. Spatial variation of void morphology in resin transfer molded E-glass/epoxy composites. *Journal of materials science letters* 22 (2003), p 1813 – 1816.

⁶⁷ Dai, J and Hahn, H. Flexural behavior of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding. *Composite Structures* 61 (2003), p 247–253.