

ESTUDIO DE LOS PARAMETROS DE FABRICACIÓN DE LAMINADOS TIPO SANDWICH MEDIANTE RTM

J. L. Mejía y E. A. Ossa

Grupo de Investigación en Materiales de Ingeniería, Escuela de ingeniería,
Universidad EAFIT, Cra 49 No 7 sur 50, Medellín, COLOMBIA

E-mail (E. A. Ossa): eossa@eafit.edu.co

J. L. Mejía presentará en ponencia

RESUMEN

Los laminados de plásticos reforzado 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 es establecer los parámetros básicos para la fabricación de este tipo de materiales que permita un correcto llenado del molde, apoyándose en la dinámica computacional de fluidos (CFD) para comprender el comportamiento del frente de flujo en el molde, para lo cual se realizó la medición de permeabilidad de diferentes refuerzos, como: telas tejidas y no tejidas de fibra de vidrio, que son un factor clave en el material. Para las mediciones de permeabilidad se utilizó el método de flujo radial mediante un molde instrumentado para tal fin. Los resultados de este estudio permitieron establecer que el comportamiento del frente de flujo en moldes planos se encuentra influenciado por la permeabilidad del tipo de refuerzo utilizado, y las simulaciones computacionales son un buen apoyo para estimar tiempos de llenado del molde, aunque omite problemas muy comunes en el proceso.

Tópico 5: Materiales Compuestos

Palabras clave: refuerzos, RTM, permeabilidad, porosidad, frente de flujo, CFD.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a sus grandes ventajas frente a los materiales tradicionales, la utilización de plásticos reforzados avanzados en la industria en general ha adquirido gran popularidad. Particularmente en la industria del transporte, en muchos casos se requieren niveles medios o altos de producción, elevada calidad, precisión en sus dimensiones, elevada resistencia mecánica y bajo peso, que solo son posibles de obtener mediante la utilización de técnicas de transformación específicas, como es el caso del moldeo por transferencia de resina (RTM). Este proceso consiste en inyectar resina catalizada en un molde cerrado en donde previamente se ha ubicado el refuerzo seco o preforma, lográndose así la impregnación del mismo, posteriormente se deja el tiempo suficiente para que ocurra el curado de la resina dentro del molde, para posteriormente desmoldar la pieza.

Para lograr óptimas propiedades mecánicas y buen acabado en piezas fabricadas por esta técnica, 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, principalmente resolviendo

variables como presión de inyección, tasa de flujo de inyección, ubicación del lugar o lugares de inyección y los sitios de salida, temperatura del molde y de la resina [1]. Para lo cual es importante establecer las 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.

El tema de medición de la permeabilidad sobre diferentes refuerzos ha sido ampliamente estudiado. Por ejemplo, Cho et al. [2] estudiaron 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, encontrando que los valores de permeabilidad en condiciones no saturadas para los diferentes refuerzos 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.

Por otro lado, el método de medición de la permeabilidad en diferentes refuerzos involucra 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. [3] y Ding et al. [4] 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 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”) [5], creando zonas de mayor y menor permeabilidad.

En este estudio se evaluó la permeabilidad a diferentes niveles de porosidad de refuerzos utilizados comúnmente en RTM, como lo son *i*) tela moldeable con núcleo de flujo; *ii*) tela discontinua no tejida (mat) y *iii*) tela tejida bidireccional (woven roving). Para la impregnación se utilizó una resina de poliéster sin catalizar. Los valores obtenidos de permeabilidad fueron evaluados por la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD), obteniendo tiempos de llenado, que fueron corroborados con los obtenidos experimentalmente. Adicionalmente se estudiaron algunos problemas comunes al momento de realizar la inyección de la resina dentro del molde.

Teoría

El conocimiento del valor de permeabilidad en refuerzos o preformas para RTM permite establecer el comportamiento del flujo en moldes que pueden ser largos y complejos, mediante la utilización de la *ley de Darcy* (ecuación 1). Mediante 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 [6].

$$\langle v \rangle = \frac{k}{\mu} (\nabla P) \quad (1)$$

Donde:

$\langle v \rangle$: Vector de velocidad de Darcy

k : Permeabilidad

μ : Viscosidad newtoniana

∇P : Gradiente de presión

Para que pueda ser aplicable la ecuación de Darcy a un fluido, es necesario que el fluido analizado presente un comportamiento newtoniano, por lo cual se asume que la resina de poliéster sin catalizar tiene este comportamiento.

Existen dos métodos experimentales ampliamente utilizados para la caracterización de flujo en fluidos viscosos a través de reforzantes: *i*) el método de flujo unidireccional y *ii*) el método de flujo radial. Para este estudio se utilizó el experimento radial que es el más empleado por los investigadores debido a que permite una rápida determinación de la permeabilidad y su orientación en el plano, con el inconveniente de ser solo aplicable para flujo no saturado [6]. Para materiales de refuerzo isotrópicos se puede observar un frente de flujo circular, mientras que para los anisotrópicos el frente del flujo llega a ser elíptico. En este estudio todos los refuerzos analizados presentan en teoría un comportamiento isotrópico, y el cálculo de la permeabilidad se explica a continuación.

Calculo de Permeabilidad Isotrópica y Porosidad

Inicialmente se debe reescribir la ecuación de Darcy para el flujo radial, que se obtiene solucionando la ecuación de Laplace en coordenadas polares, dando como resultado la ecuación (2), que expresa la velocidad radial (v_r) como:

$$v_r = -\frac{k_{rr}\partial P}{\mu \partial r} \quad (2)$$

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 (2), 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 como:

$$k = \left\{ r_f^2 \left[2 \ln \left(\frac{r_f}{r_0} \right) - 1 \right] + r_0^2 \right\} \frac{1}{t} \frac{\mu \varepsilon}{4 \Delta P} \quad (3)$$

Donde:

ε : Porosidad

μ : Viscosidad dinámica del fluido

t: 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.

ΔP : Diferencia entre la presión del frente de flujo P_f y la presión de entrada P_0

Como han publicado varios investigadores [2, 7], al graficar la derivada de la ecuación (3) 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 P .

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

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 se obtiene como:

$$\varepsilon = 1 - V_f = 1 - \frac{N W_f}{d \rho} \quad (5)$$

Donde:

N : numero de capas.

W_f : peso por unidad de área de la tela.

d : altura de la cavidad.

ρ : densidad de la fibra.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales

En este estudio 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).
- ii) Tela tejida bidireccional.
- iii) Tela especial para su uso en RTM, conocida como manta moldeable, que consiste en 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 él.

El fluido utilizado para la inyección 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 $0.22 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Diseño del molde

El molde fue diseñado teniendo en cuenta consideraciones establecidas por varios autores [2, 6, 8]. Este dispositivo consta de una cuba fabricada en acero, con espaciadores fabricados en el mismo material y una tapa en acrílico (PMMA) de 30 mm de espesor, como se representa esquemáticamente en la figura 1. En las paredes de la cuba se taladraron agujeros de 7 mm de diámetro, actuando como salidas de aire durante la inyección. Para mantener el molde cerrado y una altura de la cavidad constante durante la inyección se utilizaron ocho Prensas en C.

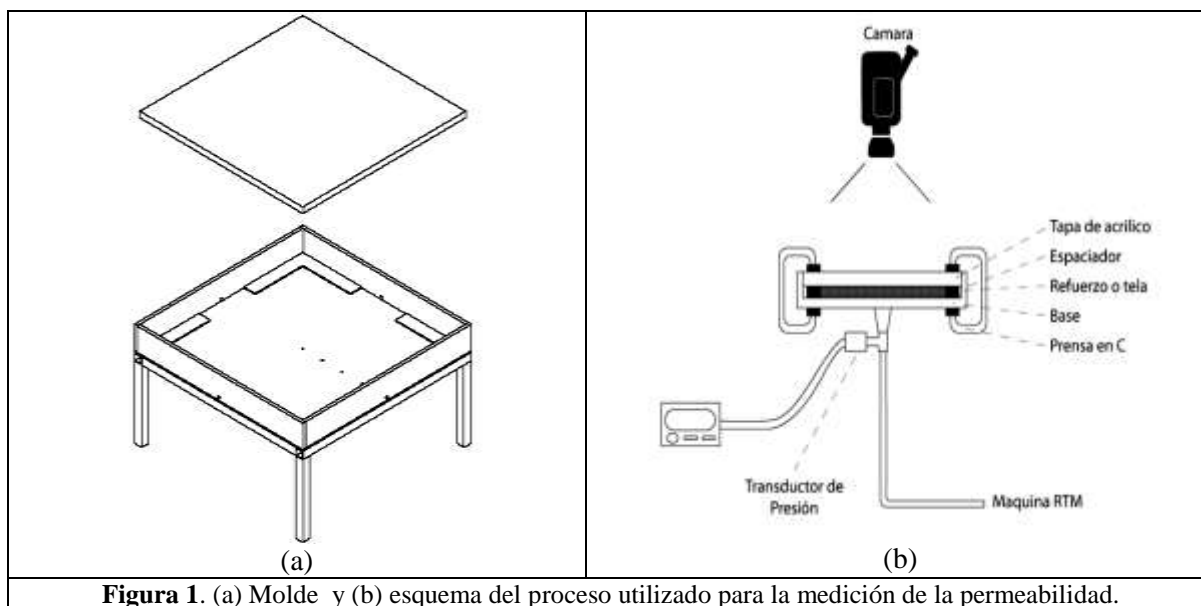


Figura 1. (a) Molde y (b) esquema del proceso utilizado para la medición de la permeabilidad.

Para la inyección de la resina dentro del molde descrito anteriormente, se utilizó una máquina de RTM de la marca *Magnum Venus Products* de la serie *Patriot*. Inicialmente se decidió realizar

ensayos preliminares sobre el molde vacío (sin refuerzo) para establecer las condiciones de inyección que garantizaran un flujo constante, es decir libre de burbujas.

La adquisición de datos se realizó por medio de un sensor de presión con rango de 0 a 413 kPa (0-60 psi), y para establecer la velocidad del avance del frente de flujo, se realizaron marcas sobre la superficie de la tapa de acrílico cada 30mm y por medio de la filmación del ensayo, utilizando una cámara de video *Sony Handycam* con un disco duro interno y un trípode se determino la velocidad del frente de flujo. Las grabaciones obtenidas fueron llevadas a un computador para ser analizadas en un editor de video y establecer los diferentes tiempos hasta alcanzar distancias establecidas al punto de inyección.

Para evaluar los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos, se calcularon valores de tiempos de llenado del molde mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD), utilizando el software *ANSYS CFX 2.1*. Los valores de permeabilidad obtenidos numéricamente fueron comparados con los resultados experimentales. Para la construcción de la malla CFD se utilizaron elementos tetraédricos. Las simulaciones se realizaron hasta alcanzar un máximo de 100 iteraciones o cuando el error residual fuera menor a 1×10^{-6} .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

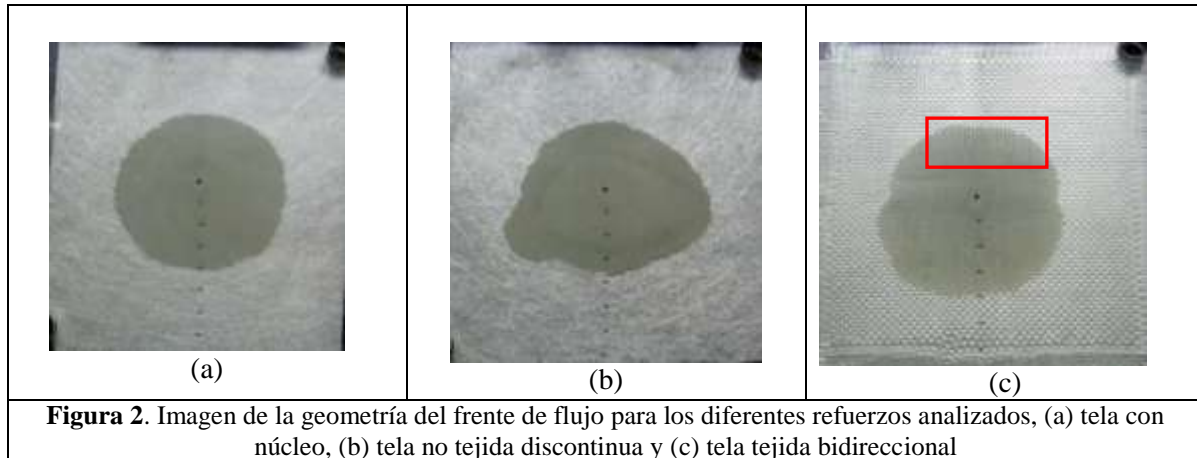
Los resultados experimentales de permeabilidad en los refuerzos estudiados con diferentes niveles de porosidad se muestran en la tabla 1. Para cada refuerzo se presentó una disminución en la permeabilidad a medida que el nivel de porosidad descendió. Algunos de los valores de permeabilidad encontrados difieren de los publicados por algunos autores. Por ejemplo, Cho et al. [2] a través de ensayos radiales sobre tela discontinua no tejida de fibra de vidrio con una porosidad de 0,8 obtuvieron un valor de permeabilidad de $3 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Mientras que los ensayos realizados en este estudio sobre ese mismo tipo de refuerzo (aunque con algo más de porosidad, 0.86), presentaron valores de permeabilidad inferiores, de $1,66 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Tal comportamiento puede estar relacionado con la utilización de resina de poliéster para la impregnación, ya que podría ocasionar una rápida disolución del apresto y por tanto un arrastre de fibras (“fiber wash”), disminuyendo la permeabilidad [5].

Tabla 1. Valores de permeabilidad de los refuerzos analizados a diferentes niveles de porosidad.

Refuerzos	Permeabilidad ($\times 10^{-9} \text{ m}^2$)	Porosidad	Viscosidad (Pa. s)	Presión (kPa)
Tela con núcleo 1	7,5	0,94	0,1308	53,77
Tela con núcleo 2	5,27	0,91	0,2196	75,84
tela no tejida discontinua 1	1,66	0,86	0,2196	87,98
Tela no tejida discontinua 2	0,86	0,72	0,2196	207,6
tela tejida bidireccional 1	11	0,7	0,2196	48,1
tela tejida bidireccional 2	1,89	0,4	0,2196	131,35

El fenómeno de arrastre de fibras mencionado anteriormente es más propenso a que ocurra en telas o refuerzos del tipo no tejido que en las tejidas, y seria la explicación del porque telas no tejidas con

una mayor porosidad presentan valores más bajos de permeabilidad, incluso el valor más bajo reportado para todos los ensayos. Por otro lado, no es correcto calcular la permeabilidad para geometrías no completamente circulares que se forman a cierta distancia del punto de inyección, como es el caso de las telas tejidas y el mat (ver figura 2), que conlleva a que en estos casos se calcule la permeabilidad con los valores de tiempo y distancia antes de apreciar la deformación de la circunferencia, que podrían estar afectando la medición, ya que el flujo no se encuentra completamente desarrollado.



Medidas de permeabilidad a diferentes niveles de porosidad para telas tejidas de fibra de vidrio han sido reportadas [9], como es el caso de una permeabilidad $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ para una porosidad de 0.59, que difiere en gran medida con los valores obtenidos experimentalmente en este estudio. Un valor elevado de permeabilidad fue encontrado en varios ensayos para este tipo de telas con porosidad de 0,7 ($11 \times 10^{-9} \text{ m}^2$), que probablemente este asociado con espacios con alto flujo (poca restricción) creados entre la tela y el molde, dada la no regularidad de la superficie de este refuerzo. Este comportamiento se puede observar en el recuadro de la figura 2 (c), en donde es posible ver las fibras del refuerzo debajo de una capa delgada de resina.

En contraste con las geometrías del frente de flujo experimentales presentadas en la figura 2, todas las simulaciones CFD realizadas para los diferentes refuerzos analizados, y para los diferentes niveles de porosidad, la geometría del frente de flujo fue circular durante la mayoría del recorrido del fluido, como se aprecia en la figura 3. Solo al llegar cerca de las paredes se provocaba una distorsión de esta geometría. Este comportamiento concuerda completamente para el caso de tela con núcleo interno de flujo, que presento una circunferencia uniforme durante todo el proceso de llenado del molde.

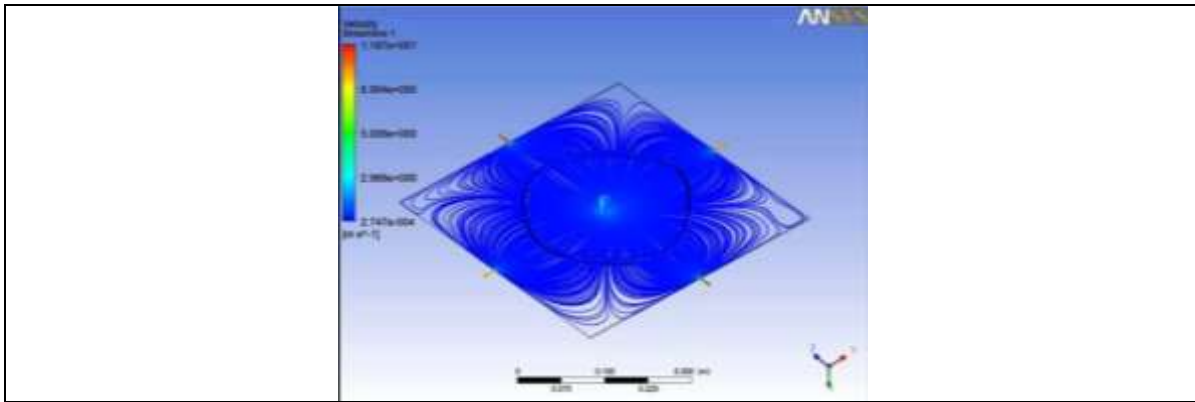


Figura 3. Imagen de la simulación por CFD, en donde se aprecia la forma circular del frente de flujo

Al comparar los tiempos experimentales que le toma al frente de flujo llegar a una distancia determinada del sitio de inyección (0,18 m), se observa que existe cierto grado de aproximación para solo dos de los valores obtenidos por la simulación CFD (ver tabla 2), mientras que para los demás existe un alto grado de error. Estos datos arrojados por el software podrían estar afectados por la exactitud de las mediciones de la permeabilidad mencionados anteriormente. 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.

Tabla 2. Comparación de tiempos de llenado experimentales versus simulaciones para un $r_f = 0.18$ m.

Refuerzos	Tiempo experimental (s)	Tiempo de simulación (s)
Tela con núcleo 1	11	4,5
Tela con núcleo 2	17	7,5
tela no tejida discontinua 1	16	5,3
Tela no tejida discontinua 2	21	20
tela tejida bidireccional 1	9	5,4
tela tejida bidireccional 2	14	16

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 conocido como “race track” [10] que puede ser apreciado en la figura 4.



Figura 4. Secuencia de formación de una línea de avance rápido del frente de flujo.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se verificó que la forma como está dispuesta la fibra, tejida, no tejida o con núcleos de flujo, afecta en gran medida los valores de permeabilidad durante el proceso de inyección. Para obtener simulaciones acertadas a las condiciones reales se deben utilizar datos muy precisos de permeabilidad, aunque los resultados de esta no permitirán predecir las trayectorias del frente flujo reales que se presentaran durante el proceso.

La utilización de la resina específica que se utilizará para la inyección de la pieza a fabricar para la medición de permeabilidad sobre diferentes refuerzos ayuda a evidenciar posibles problemas relacionados con el arrastre de fibra y líneas de avance rápido del fluido que no sería posible verificar por medio de la utilización de otros tipos de fluidos, como gas y otros líquidos, y a través de simulación computacional tradicional.

Adicionalmente, se puede concluir que el comportamiento de la tela con núcleo de flujo en condiciones de procesamiento reales en un molde para RTM, no debería presentar problemas de procesamiento descritos anteriormente, debido a que se presentó un flujo constante durante todos los ensayos realizados.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran expresar su agradecimiento a la Universidad Eafit por su apoyo económico para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

1. F. Sanchez, J.A. Garcia, F. Chinesta, Ll. Gasco, C. Zhang, Z. Liang and B. Wang, "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.
2. Y.K. Cho, Y.S. Song, T.J. Kang, K. Chung and J.R. Youn, "Permeability Measurement of a Circular Braided Preform for Resin Transfer Molding"; *Fibers and Polymers*, Vol.4 (2003), p. 135-144.
3. R. Pomeroy, S. Grove, J. Summerscales, Y. Wang, A. Harper, "Preform Characterisation for Resin Transfer Moulding"; *Composites Processing Association Limited*. April 2006.
4. Li Ding, Chiang Shih, Zhiyong Liang, Chuck Zhang and Ben Wang, "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.
5. J. S. Hayward and B. Harris, "Effect of process variables on the quality of RTM mouldings"; *Sampe Journal*, Vol 26 (1990), P 39-46.
6. T. M. Kruckenberg, *Resin transfer moulding for aerospace structures*. Kluwer academic publishers. 1998.
7. J.R. Weitzenbo, R.A. Shenoi and P.A. Wilson. "Radial flow permeability measurement. Part A: Theory" *Composites: Part A*. vol 30 (1999), P 781–796
8. Chiu, C. H. In-Plane Permeability of Stitched MMWK Laminates in Resin Transfer Molding. 391 *Journal of Reinforced Plastics and Composites*(2002) 21; 391.
9. H. Golestanian, "Experimental determination of preform permeability variation with porosity for woven fiberglass and carbon mats" 13th International Conference on Experimental Mechanics. July 1 2007.
10. F. C. Campbell, *Manufacturing Processes For Advanced Composites*. El sevier. 2004.