



HAL
open science

Caracterización Experimental del Efecto Borde en el Conformado por Transferencia de Resina (LCM)

Isabel Ordeig, Juan García, Francisco Chinesta, Francisco González

► **To cite this version:**

Isabel Ordeig, Juan García, Francisco Chinesta, Francisco González. Caracterización Experimental del Efecto Borde en el Conformado por Transferencia de Resina (LCM). *Anales de Ingeniería Mecánica*, 2002, sans. ⟨hal-00021143⟩

HAL Id: hal-00021143

<https://hal.science/hal-00021143v1>

Submitted on 22 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Caracterización Experimental del Efecto Borde en el Conformado por Transferencia de Resina (LCM)

I. Ordeig⁽¹⁾, J.A. García⁽¹⁾, F. Chinesta⁽²⁾, F.González⁽¹⁾.

⁽¹⁾ *Universidad Politécnica de Valencia. Dpto Ing. Mecánica y Materiales
Camino Vera s/n, 46022, Valencia. Email: iordeig@mcm.upv.es*

⁽²⁾ *Laboratoire de Mécanique des Systèmes et des Procédés, UMR CNRS-ENSAM-ESEM
151 Boulevard de l'Hopital, 75013 Paris*

Resumen

En el presente trabajo se ha estudiado y modelizado el efecto borde en el Conformado por Transferencia de Resina (LCM). Se han utilizado diferentes espesores de borde, canal donde no hay fibra, y se han comparado los resultados experimentales con la simulación numérica mediante elementos finitos. La información obtenida puede servir como ayuda para el cálculo de los canales de llenado, localización de salidas de aire y para una correcta estimación de la permeabilidad equivalente.

Palabras Clave: Efecto borde, LCM, Resin Transfer Moulding, RTM.

1. Introducción

Una de las fases más críticas en los procesos de conformado de materiales poliméricos compuestos por inyección de resina (LCM), es la impregnación de la fibra, en el interior del molde. Para maximizar las propiedades mecánicas de la pieza final es fundamental la total impregnación del tejido de refuerzo. El efecto borde es un fenómeno que inevitablemente se produce durante el llenado de moldes cargados con fibras y ocurre en los huecos que quedan entre las capas de tejido y las paredes del molde. Estos huecos crean canales por donde el caudal es mucho mayor que por el resto del molde. La principal consecuencia es la pérdida de control sobre el llenado del molde, lo que imposibilita una correcta simulación del llenado y la previsión del campo de presiones. Tradicionalmente este efecto se ha considerado como un factor indeseable e inevitable, sin embargo en los últimos años se ha visto que este efecto puede utilizarse para reducir la presión de inyección o disminuir el tiempo de llenado. En caso de inyectar con asistencia de vacío, el efecto borde ayuda a guiar al frente de avance hacia el punto de vacío, que generalmente se encuentra situado en un punto intermedio de la pieza.

Para una correcta simulación numérica de la fase de llenado utilizando un flujo Darcy, Ecuación (1), se hace necesario caracterizar el efecto borde mediante la definición de una permeabilidad equivalente en los canales del molde donde no hay fibra [2,4,5], o bien

utilizar las ecuaciones de Stokes para el cálculo del flujo viscoso entre placas [6]. La permeabilidad es una variable de difícil medición, pero que resulta fundamental para una correcta simulación del Moldeo por Transferencia de Resina (RTM) o Moldeo por Vacío (VM-VARTM). Existen numerosos métodos para medirla, bien mediante técnicas experimentales, mediante técnicas numéricas, o como una combinación de ambas [1,3].

$$\langle v \rangle = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad \langle v \rangle = \text{Velocidad promedio} \quad \underline{K} = \text{Tensor Permeabilidad} \quad (1)$$

$$P = \text{Presión} \quad \mu = \text{Viscosidad fluido}$$

En el presente trabajo se pretende describir experimentalmente el comportamiento del efecto borde en el llenado de molde, y finalmente modelar el llenado mediante una técnica explícita de elementos finitos.

2. Montaje experimental

Los ensayos realizados se han realizado mediante un molde con una de sus mitades construidas en metacrilato, que permite la visualización del frente de avance. La cavidad tiene unas dimensiones de 260*500mm² y un espesor de 3mm, que se asemeja al espesor de la mayoría de las piezas construidas mediante RTM-VM. El espesor de la cavidad se genera mediante la inserción de un marco de 3mm de espesor entre las dos mitades del molde. La mitad superior del molde de metacrilato tiene un espesor de 40mm, mientras que la inferior es de aluminio de 20mm de espesor.

Dado que el objeto del montaje es la observación del frente de avance, se puede utilizar cualquier fluido del que se conozca su comportamiento a T^a ambiente. La presión de inyección oscilará entre 0.5 y 2 bares, para que la velocidad del fluido sea suficientemente baja para que tenga validez en todo momento la ecuación de Darcy. Una vez inyectado el fluido dentro del molde se graba la secuencia de avance con una cámara digital, que permitirá su análisis y comparación con los resultados teóricos del modelo.

Se ha reproducido en el molde un canal preferente para el paso del flujo de resina que simula el efecto borde, cortando las telas con diferentes espesores de borde. Se trabajará con diferentes dimensiones de canal (h). Se utilizará un tejido de fibra de vidrio tipo sandwich (Rovicore©, 200/D3/200) y se inyectará un aceite de silicona (Dow Corning 200 ©) con un comportamiento quasi-newtoniano y una viscosidad de 0.1 Pa*s, similar a las resinas poliméricas utilizadas en RTM-VM.

El procedimiento de corte y manipulación es fundamental y ha de permitir un corte limpio y fácil manipulación, transporte y posicionado de las telas. El proceso de corte se ha efectuado mediante un cortador circular. Para guiar el corte se han utilizado plantillas rígidas mecanizadas en CNC.

3. Medición de la permeabilidad

Para la medición de la permeabilidad se ha utilizado el ensayo unidireccional a presión constante [3]. Este ensayo consiste en observar el frente de avance en el interior de un molde rectangular donde se inyecta a presión constante a lo largo de uno de sus laterales. Para que el ensayo sea correcto hay que evitar el efecto borde en las proximidades de las paredes del molde ($h=0$). Para la medición de la permeabilidad se puede inyectar cualquier fluido cuya viscosidad sea conocida y cuyo valor nos permita trabajar con un número de Reynolds aproximado de 1, lo que nos asegura la validez de la ecuación de Darcy.

Supuesta la permeabilidad constante y el flujo incompresible ($\text{div}\langle \underline{v} \rangle = 0$) y gobernado por la ley de Darcy, obtendremos la expresión que gobierna el problema unidimensional:

$$v_f = \frac{dx_f}{dt} = + \frac{K p_i}{\mu \phi x_f} \quad (2)$$

donde x_f es la posición del frente de avance y ϕ es la porosidad de la tela y nos permite relacionar la velocidad promedio con la velocidad del frente de avance, $\langle \underline{v} \rangle = \phi v_f$. Integrando la ecuación (2) nos permite obtener la expresión de la permeabilidad de la preforma en función de la posición del frente de avance y del tiempo, t:

$$K = \frac{\mu \phi}{2 p_i t} (x_f^2 - x_0^2) \quad (3)$$

donde x_0 es la posición del frente de avance en el instante inicial ($t=0$). Si se supone $x_0=0$, se deduce, que la variación respecto del tiempo del cuadrado de la posición del frente de avance es constante y directamente proporcional a la permeabilidad según la expresión:

$$\frac{d(x_f^2)}{dt} = \frac{2K p_i}{\mu \phi} \Rightarrow K = \frac{d(x_f^2)}{dt} \frac{\mu \phi}{2 p_i} \quad (4)$$

Por lo tanto se puede representar el valor de la permeabilidad a lo largo del llenado, cuya pendiente es el incremento cuadrático de la posición del frente de avance respecto del tiempo. Dado que la presión de inyección es medida en el depósito presurizado, debemos tener en cuenta la pérdida de presión por efecto viscoso que, para un conducto de sección circular, será:

$$\Delta p = \frac{128\mu LQ}{\pi d^4} \quad (5)$$

donde L y d son la longitud y diámetro del conducto respectivamente y Q el caudal. Estas pérdidas de presión provocan que la presión de inyección sea inferior a la deseada y variable con el tiempo. En la Figura 1a se representa la presión en el lateral de inyección, cuando la presión en el depósito presurizado es de 0.1 bar.

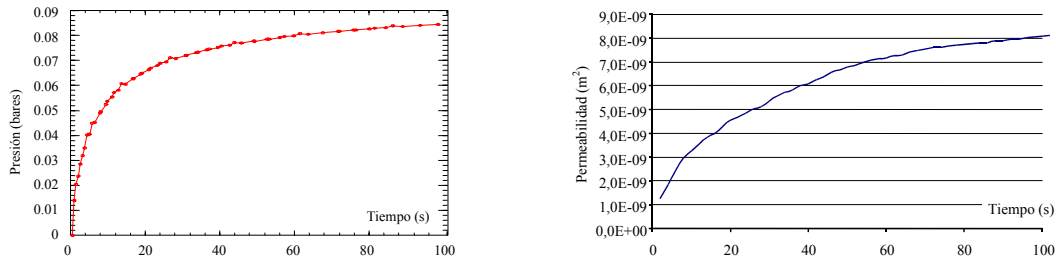


Figura 1. a) Presión en $x=0$, b) Permeabilidad aparente durante el llenado

En la Figura 1b se representa la medición de la permeabilidad a lo largo del llenado, utilizando la expresión (3), con una presión de inyección de 0.1 bar. El instante de tiempo inicial corresponde al momento en el que se ha llenado por completo el lateral del molde. La porosidad de la tela ha sido medida y tiene un valor de 0.88. El valor de la permeabilidad de la tela es el valor asintótico de la curva [4] de la Figura 1b (permeabilidad aparente), corregida con las pérdidas de presión viscosas, ec.(5), y tiene un valor de $9.9 \cdot 10^{-9} \text{m}^2$. En la Figura 2 se representa tres instantes del ensayo llenado del molde, utilizado para medir la permeabilidad y las correspondientes simulaciones numéricas. Se puede observar como los resultados de la simulación se ajustan con bastante precisión a los resultados experimentales.

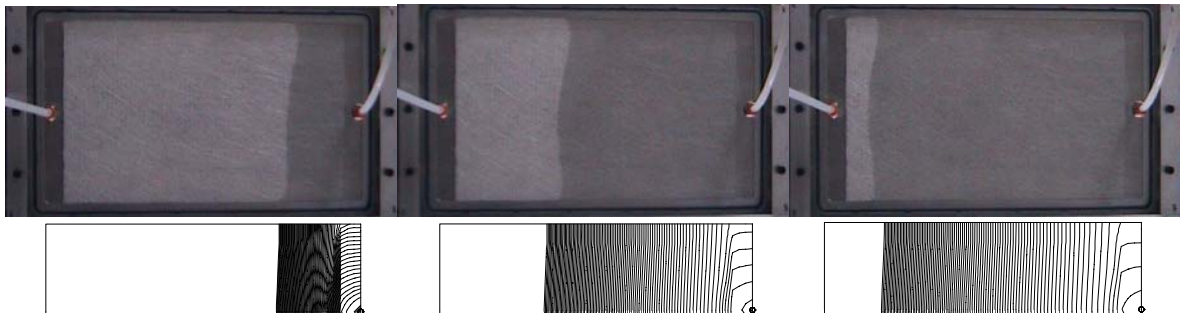


Figura 2. Frente de avance a los 10, 60 y 90 segundos, $h=0\text{mm}$. Experimental y simulado.

4. Resultados y discusión

Se ha estudiado el efecto borde para tres espesores de canal diferente: 2.5, 5 y 7mm. Para la verificación numérica de los resultados se ha utilizado un código de elementos finitos y la malla utilizada ha sido de 19205, 5205 y 2561 elementos respectivamente para

cada uno de los ensayos. Se ha modelado el conducto de alimentación para tener en cuenta las pérdidas por efecto viscoso. En todos los casos la presión a la salida del depósito presurizado es de 0.5 bares y la viscosidad del fluido es de 0.1 Pa*s. En las imágenes de la Figura 3 puede observarse la posición y forma del frente de avance en tres instantes de tiempo diferentes, y la predicción obtenida mediante la simulación para un espesor de canal de 2.5 mm (medio molde debido a la simetría).

Las figuras 5 y 6 muestran resultados análogos, pero para un espesor de canal de 5 y 7 mm respectivamente. Puede observarse que a medida que el espesor de canal es mayor, el frente de avance llena más rápidamente la cavidad. La posición de la salida de aire óptima se sitúa en un punto más cerca del centro de la pieza cuanto más grande es el borde y lógicamente el área del frente de avance se incrementa con h. Puesto que para esta serie de ensayos el punto de salida de aire es fijo, los resultados obtenidos una vez que el frente de avance alcanza el punto de salida no son tenidos en cuenta.

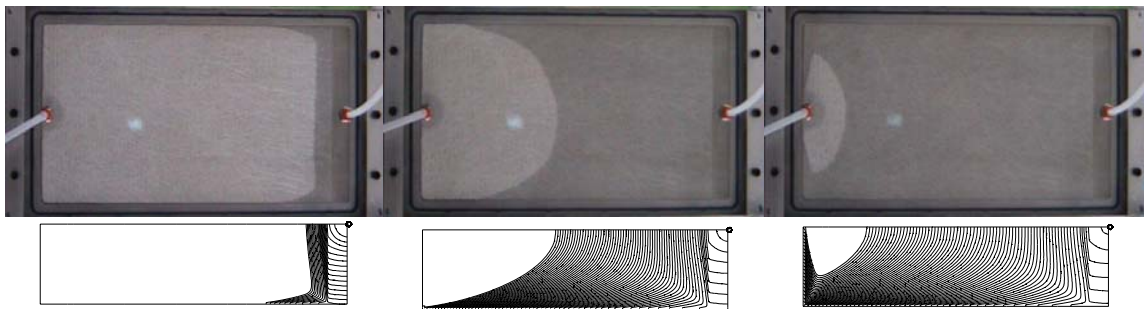


Figura 3. Frente de avance a los 2, 30 y 45 segundos, $h=2.5\text{mm}$. Experimental y simulado.

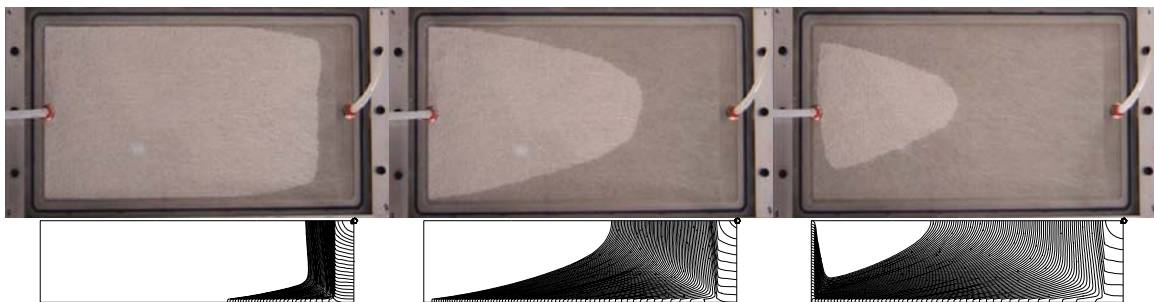


Figura 4. Frente de avance a los 2, 11 y 18 segundos, $h=5\text{m}$. Experimental y simulado.

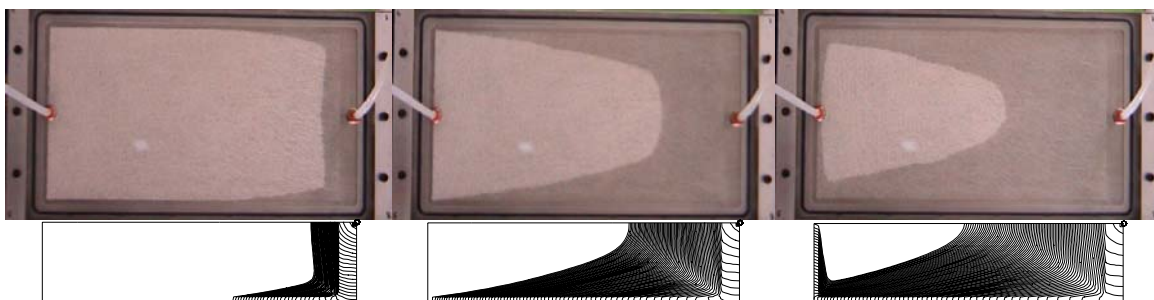


Figura 5. Frente de avance a los 2, 10 y 15 segundos, $h=7\text{mm}$. Experimental y simulado

5. Conclusiones

La información obtenida del presente trabajo puede servir como ayuda para el cálculo de los canales de llenado en el llenado por vacío. Se ha observado que la sección media del frente de avance se estabiliza en un valor que depende del tamaño del canal y del tipo de resina y tejido. El molde empleado, a nuestro juicio, debería ser de mayor longitud para que este efecto fuera más evidente. La medición de la permeabilidad a presión constante resulta complicada al ser variable la velocidad a lo largo del llenado, la medición a caudal constante simplificaría el método. El control de presión debería colocarse en el mismo molde Para evitar pérdidas viscosas. Para un correcto llenado del molde es necesario la colocación del punto de vacío en un punto intermedio del molde, cuya localización depende del espesor de canal. La simulación por ordenador del llenado del molde permite predecir con exactitud la posición de este punto de vacío, la predicción del tiempo de llenado, etc. Es posible realizar una simulación correcta resolviendo las ecuaciones de Stokes en la parte sin tela del molde, y la ecuación de Darcy en la parte cargada [6]. De forma análoga se podría haber definido una permeabilidad equivalente en el borde y los resultados serían muy parecidos.

6. Referencias

1. S.G. Advani (Editor). *Flow and Rheology in Polymeric Composites Manufacturing*, Ed. Elsevier, New York, (1994).
2. S. Bickerton, S.G. Advani, R.V. Mohan, D.R. Shires. *Experimental Analysis and Numerical Modeling of Flow Channel Effects in Resin Transfer Molding*, Polymer Composites, Vol. (21), Nº 1, (2000).
3. Moon-Kwang Um, Sang-Kwan Lee, *A Study on the Determination of In-Plane Permeability of Fiber Preforms*, Polymer Composites, Vol. (20), Nº 6, (Dec. 1999).
4. J. Sheard, V. Senft, S. C. Mantell, J.H. Vogel, *Determination of Corner and Edge Permeability in Resin Transfer Molding*. Polymer Composites, Vol. (19), Nº 1, (1998).
5. S. Bickerton, S.G. Advani, *Characterization and modeling of race-tracking in liquid composite molding processes*, Composites Science and Technology, Vol.(59), Nº 15, (1999).
6. A. Hammami, R. Gauvin, F. Trochu. *Modeling the edge effect in liquid composites molding*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.(29), Nº 5-6, (1998).

7. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con la financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCYT) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), proyecto DPI2001-2792.

Agradecer la colaboración a Chomarar y Productos Jemg, por la cesión del Rovicore© y por su asesoramiento técnico.