

MODELADO NUMÉRICO DEL PROCESO “RESIN TRANSFER MOULDING” (RTM)

Diego Santiago^a, Guillermo Lombera^a y Santiago Urquiza^a

^aGrupo de Ingeniería Asistido por Computadora, Universidad Nacional de Mar del Plata, J. B. Justo 4302, 7600 Mar del Plata, Argentina(CONICET), dsantiago@fi.mdp.edu.ar

Palabras clave: resin transfer moulding, materiales compuestos, procesamiento, VOF.

Resumen. El proceso RTM se utiliza para obtener piezas de plástico reforzado con fibras de distintos tipos. Este consiste en la inyección por presión y/o vacío de un polímero reactivo (líquido viscoso) en un molde lleno del refuerzo en forma de fibras (medio poroso).

En este trabajo se modeló el proceso RTM como un flujo a través de un medio poroso aplicando la ley de Darcy y considerando flujo incompresible. El avance de la región impregnada se modeló aplicando la técnica denominada “Volumen of fluid” (VOF), utilizando el campo de velocidades del flujo. La técnica VOF se implementó con un esquema puramente convectivo con estabilización SUPG. Se modeló un ejemplo bajo distintas condiciones para analizar el desempeño del algoritmo.

INTRODUCCIÓN

El proceso de moldeo por impregnación de resina o “resin transfer moulding”(RTM) se utiliza para construir piezas de materiales compuestos. Este proceso consiste básicamente de cuatro pasos. En el primero se genera una preforma de fibra de refuerzo con la forma de la pieza a construir. El segundo paso consiste en la impregnación con resina de la preforma ubicada en la cavidad del molde. El tercer paso es el proceso de curado de la resina, que comienza durante la primera etapa o después de ésta. El último paso es el desmolde de la pieza luego que el proceso de curado de la resina terminó y la pieza tiene su forma final. En la [Figura 1](#) se muestra un esquema de la segunda etapa del proceso de RTM, el llenado del molde, que es el centro de este trabajo.

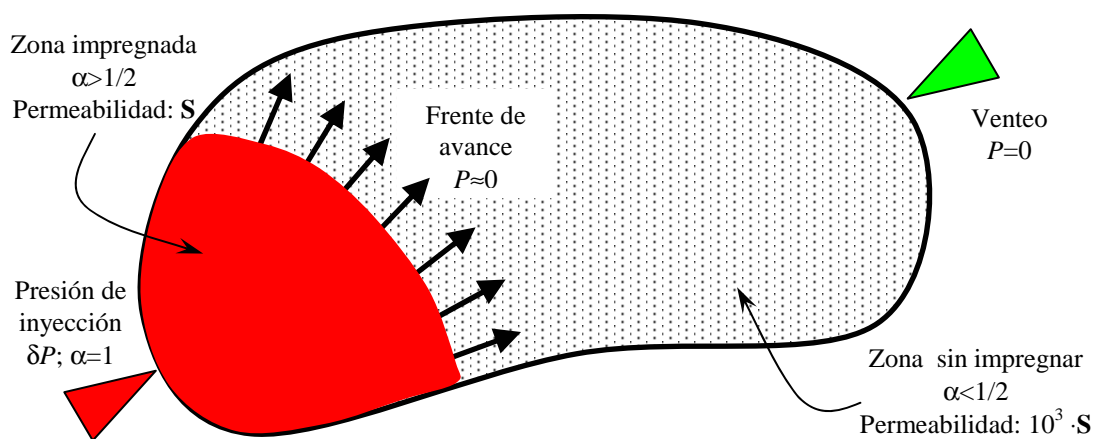


Figura 1: Esquema del proceso de RTM y condiciones de contorno.

La etapa de llenado es la clave del éxito del proceso. La impregnación de la resina se produce por una diferencia de presión entre los puntos de inyección y de venteo dentro del molde. La ubicación de los puntos de inyección y venteo es determinante para obtener una pieza sana. Una ubicación incorrecta de dichos puntos genera regiones sin resina (huecos) y, en consecuencia, piezas defectuosas de bajas propiedades mecánicas. Por lo tanto, la capacidad de predecir la formación de huecos durante el llenado del molde en el proceso de RTM permite mejorar el proceso de diseño y colocación de los puntos de inyección y venteo, reduciendo el número de pruebas asociadas a la puesta a punto de una nueva pieza.

En este trabajo se modeló el proceso de RTM como un flujo a través de un medio poroso aplicando la ley de [Darcy \(1856\)](#) y considerando flujo incompresible. El avance de la región impregnada se modeló aplicando la técnica denominada “Volumen of fluid” (VOF) ([Hirt y Nichols, 1981](#)), utilizando el campo de velocidades del flujo. La técnica VOF se implementó con un esquema puramente convectivo con estabilización SUPG ([Hughes, 1987](#)). Se modeló un ejemplo bajo distintas condiciones para analizar el desempeño del algoritmo.

1 MODELO MATEMÁTICO

1.1 Campo de presiones y velocidades

En este modelo se asume una relación entre la velocidad del flujo y el gradiente de la presión en la resina. Esta relación está determinada por la ley de [Darcy \(1856\)](#) para flujo en

medios porosos:

$$V = -\left(\frac{\mathbf{S}}{\eta}\right) \cdot \nabla P \quad (1)$$

donde V es la velocidad media del flujo, \mathbf{S} es el tensor de permeabilidad asociado a la fibra de refuerzo, η es la viscosidad de la resina y P es la presión.

Además, se asume la condición de flujo incompresible:

$$\nabla(V) = 0 \quad (2)$$

De esta manera, combinando la ecuación 1 y 2 tenemos:

$$\nabla\left(\left(\frac{\mathbf{S}}{\eta}\right) \cdot \nabla P\right) = 0 \quad (3)$$

considerando que \mathbf{S} y η no varían con la velocidad o la presión del flujo, finalmente tenemos:

$$\left(\frac{\mathbf{S}}{\eta}\right) \cdot \Delta P = 0 \quad (4)$$

donde Δ es el operador laplaciano aplicado a la presión.

1.2 Frente de avance

Para modelar el llenado del molde se utiliza la técnica denominada “volume of fluid” (VOF). Este método consiste en transportar una variable α que determina la fracción de llenado del dominio. Esta variable vale cero en las zonas vacías ($\alpha=0$) y uno en las zonas llenas ($\alpha=1$). La fracción de llenado α es transportada por la velocidad media del flujo V aplicando la derivada material:

$$\frac{d\alpha}{dt} + V \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (5)$$

La derivada material de α está igualada a cero porque no existe ninguna fuente ni sumidero distribuidos en el dominio en este proceso.

Se asume que el frente de avance de la resina se ubica donde $\alpha=1/2$. La ventaja de esta técnica se basa en la simplicidad para capturar la frontera, ya que no es necesario registrar las divisiones y reconexiones de la misma.

2 IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

La implementación numérica se realizó en tres pasos. En el primer se resuelve la distribución de presiones P . En el segundo se interpola el campo de velocidades V' obtenido a partir del gradiente de las presiones P . En el último paso se evalúa la fracción de llenado α , advectada por el campo de velocidades V' .

Todas las formulaciones aplicadas se obtuvieron a partir del método de elementos finitos y pueden ser implementadas en caso 2D o 3D. En este trabajo se utilizó un programa de propósitos generales desarrollado por [Urquiza et al.\(2002\)](#) para implementar un ejemplo 2D con elementos triangulares.

Los sistemas de ecuaciones lineales obtenidos en cada paso son resueltos por el método de gradientes conjugados cuadrados con un preconditionador de factorización incompleta de tipo LU de acuerdo al esquema propuesto por Saad (1994) en SparseKit.

2.1 1^{er} paso: cálculo de presiones P

La distribución de presiones se calculó aplicando una formulación típica de elementos finitos para problemas de Poisson (Zienkiewicz, 1991). Se utilizaron elementos triangulares con interpolación cuadrática. Se impusieron condiciones de Dirichlet en los nodos correspondientes a los puntos de inyección y venteo (ver Figura 1). En los puntos de inyección se impuso $P = \delta P$ y en los de venteo $P = 0$, donde δP es la presión de inyección relativa.

Por otro lado, si en la región llena ($\alpha > 1/2$) el valor de permeabilidad es S , en la región vacía ($\alpha < 1/2$) se asumió un valor de permeabilidad $10^3 \cdot S$. Esta estrategia permite imponer un valor de presión prácticamente nulo en la frontera de avance ($P \approx 0$) si necesidad de colocar condiciones de contorno en la misma, haciendo el algoritmo mucho más simple.

2.2 2^{do} paso: cálculo de velocidades medias V'

En este paso se interpolan los valores de velocidades V obtenidos de la ecuación 1, que es un campo lineal y discontinuo elemento a elemento, en un campo de velocidades V' lineal y continuo elemento a elemento (ver ecuación 6). Esta formulación se obtuvo minimizando la diferencia entre V y V' por residuos ponderados con la siguiente formulación:

$$\left[\int_{\Omega_e} \phi_i \phi_j d\Omega_e \right] \cdot V'_j = \int_{\Omega_e} \phi_i V d\Omega_e \quad (6)$$

en donde los subíndices i y j recorren la cantidad de nodos en los que se interpola V' (en esta aplicación van de uno a tres, ya que V' se interpola con elementos triangulares lineales) y Ω_e es el dominio del elemento.

2.3 3^{er} paso: cálculo de la fracción de llenado α

Los valores de α se interpolaron con elementos triangulares cuadráticos para captar mejor la discontinuidad de la variable en la frontera y reducir la difusividad artificial en dicha zona. La implementación se basó en una formulación típica de elementos finitos con estabilización SUPG (Hughes, 1987) y con un esquema de avance en el tiempo totalmente implícito. El paso de tiempo se modificó a medida que el frente avanzaba para mantener los valores del número de Courant lo más próximos a uno, pero manteniendo la estabilidad del algoritmo.

El valor inicial de α en todo el dominio es cero, mientras que en los puntos de inyección tiene valores impuestos de $\alpha = 1$ (Condición de Dirichlet). De esta manera, a medida que el flujo avanza sobre el dominio, el valor de α es transportado con este.

3 EJEMPLOS NUMÉRICOS

En la Figura 2 se muestra la geometría del ejemplo utilizado para probar el modelo propuesto. Sobre esta geometría se analizarán dos casos para probar la capacidad del modelo de predecir huecos en el llenado y la capacidad del frente de llenado para rodear obstáculos. En el primer caso, se colocó un punto de inyección en la esquina superior izquierda (ESI) y uno de venteo en la esquina inferior derecha (EID). En el segundo caso se colocaron dos puntos de inyección, uno en la esquina inferior izquierda (EII) y otro en la esquina superior

derecha (ESD), y uno de venteo en la esquina inferior derecha (EID) (ver Figura 2).

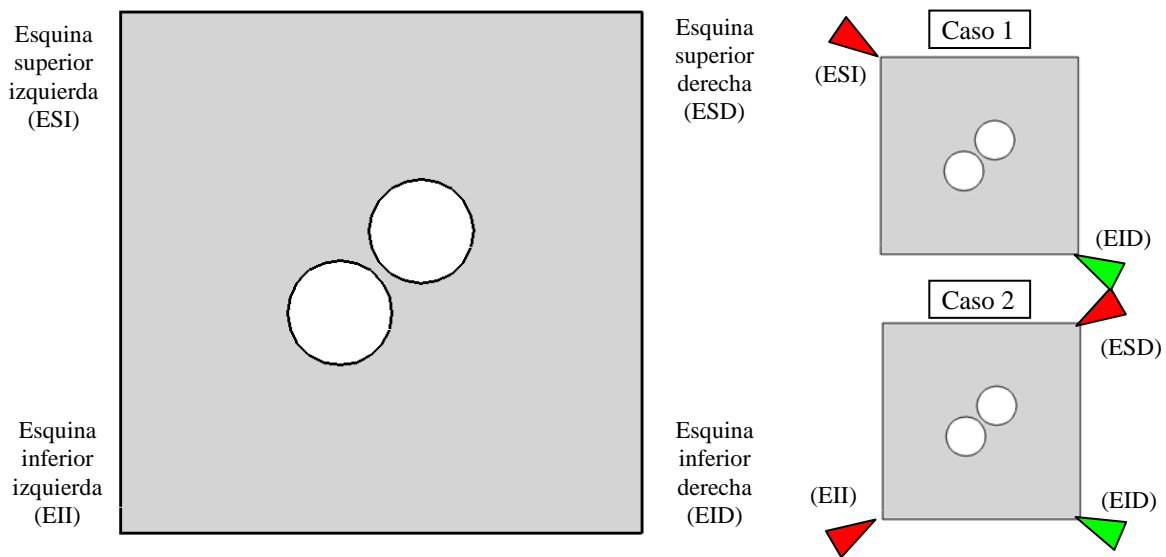


Figura 2: Geometría del ejemplo y casos resueltos.

En ambos caso, el cociente entre permeabilidad y viscosidad utilizado fue $\left(\frac{s}{\eta}\right)=1$ (ver ecuación 1) y el valor de la presión en los picos de inyección $\delta P=1$. En esta aplicación no se tuvieron en cuenta parámetros físicos representativos del proceso de RTM porque este trabajo fue un análisis preliminar de la capacidad del modelo para predecir huecos en el llenado.

En la Figura 3 se muestra la malla de elementos finitos utilizada para resolver los casos propuestos. Esta malla cuenta con aproximadamente 2500 nodos y 1200 elementos triangulares.

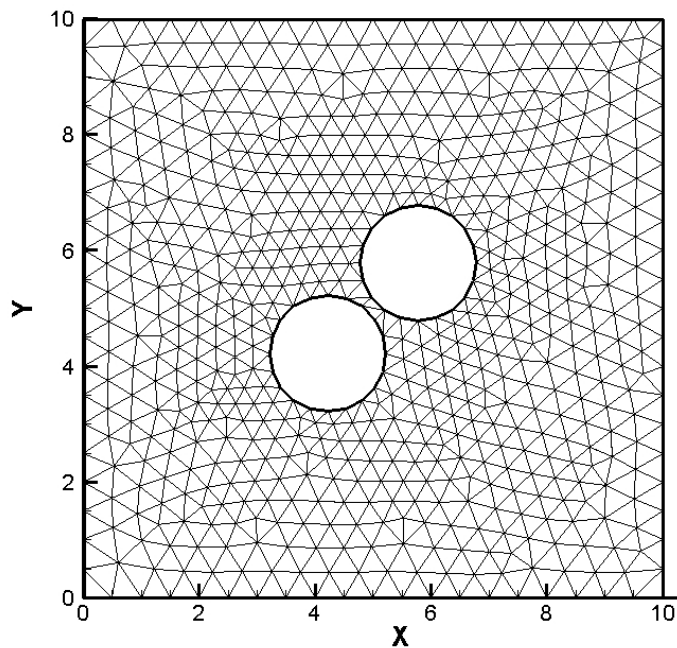


Figura 3: Malla de elementos finitos utilizada en el ejemplo.

4 RESULTADOS

En la [Figura 4](#) se muestran las líneas del frente de avance para intervalos de tiempo regulares en los ejemplos resueltos (Caso 1 y 2).

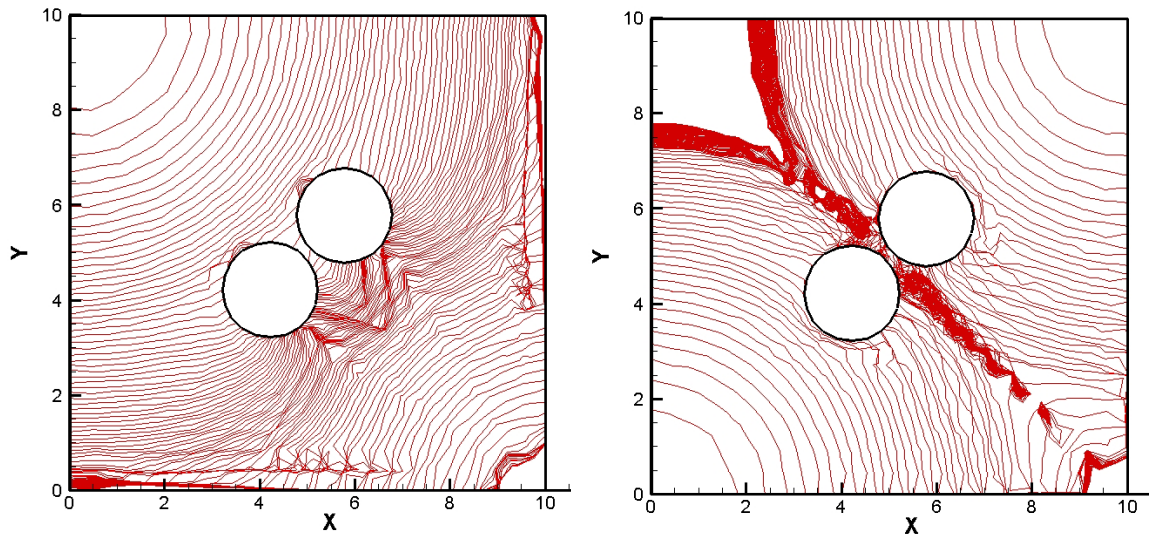


Figura 4: frentes de avance del flujo a intervalos regulares de tiempo (Caso 1 (izq) y Caso 2 (der)).

Estas líneas de frente de flujo corresponden a los valores de $\alpha=1/2$. En la [Figura 5](#) se muestra distintos momentos en los que avanza el flujo para el Caso 1 con intervalos regulares de tiempo. Se puede observar como el frente de avance rodea los obstáculos dentro del dominio y se une nuevamente. Esto muestra la capacidad de la técnica VOF para dividir y volver a unir el frente de avance.

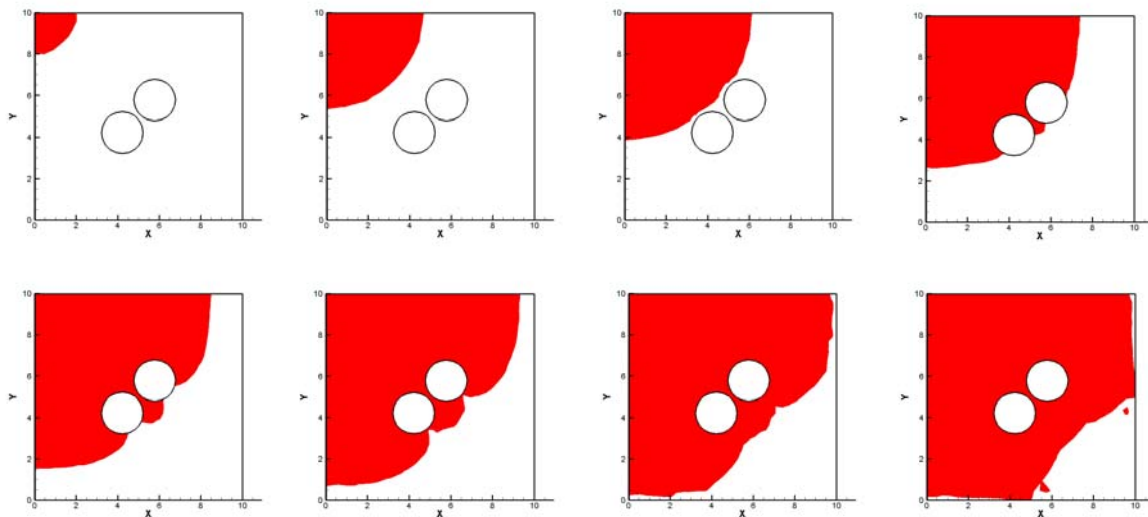


Figura 5: Avance del llenado en el Caso 1.

En la [Figura 6](#) se muestra llenado para el Caso 2, en las mismas condiciones que para el Caso 1. Se puede observar como el avance del flujo se detiene, dejando un espacio sin llenar en la ESI. Esto también se puede observar en la [Figura 4](#), donde las líneas correspondientes al frente de avance comienzan a superponerse.

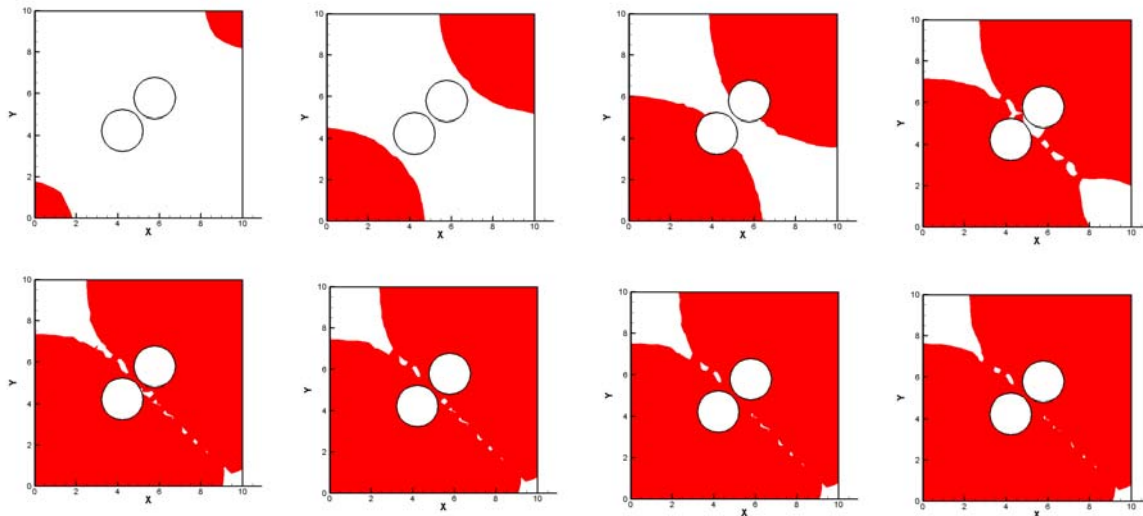


Figura 6 : Avance del llenado en el Caso 2.

5 CONCLUSIONES

Se implemento un modelo para predecir el avance del llenado del molde en el proceso RTM.

Se modeló un ejemplo con distintos puntos de inyección y de venteo para analizar la capacidad del modelo de predecir la formación de huecos durante el llenado del molde. Con este ejemplo se observó que el modelo podía predecir la formación de huecos y se verifica la capacidad de dividir y reconectar los frentes de llenado de la técnica VOF.

REFERENCES

- H. D'arcy. *Les Fontaines Publiques de la villa de Dijon*. Paris: Dalmont; 1856.
- C. W. Hirt and B. D. Nichols. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39: 201-225, 1981.
- T. J. R. Hughes. *The finite element Method*. Prentice-Hall, 1987.
- Y. Saad. SPARSEKIT: a basic tool kit for sparse matrix computation (version2). University of Illinois. <http://www-users.cs.umn.edu/~saad/software/SPARSKIT/sparskit.html>, 1994.
- S.A. Urquiza, M. J. Venere. An application framework architecture for FEM and others related solvers. *Mecánica Computacional Vol XXI*, pp 3099-3109, 2002.
- O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor. *The finite element method*, volume II. McGraw Hill, 1991.