

## MODELADO NUMÉRICO DEL PROCESO DE PULTRUSIÓN EN MATERIALES COMPUESTOS

Diego Santiago, Guillermo Lombera., Santiago Urquiza y Stella M. Moschiar

Facultad de Ingeniería, Univ. Nac. de Mar del Plata, J. B. Justo 4302, 7600, Mar del Plata,  
Bs.As., Argentina. Teléfono (054-223)4816600  
[glombera@fi.mdp.edu.ar](mailto:glombera@fi.mdp.edu.ar)

**Palabras Clave:** Materiales compuestos, Pultrusión, Elementos Finitos

**Resumen:** *El objeto de este trabajo es el modelado del curado no isotérmico de materiales compuestos pultruidos, resolviéndolo numéricamente mediante la utilización de técnicas de elementos finitos a partir de un programa desarrollado para tal fin.*

*Este modelo permite obtener los perfiles de temperatura y conversión de la resina a lo largo del molde, el que luego nos permitirá predecir también las presiones en la boquilla de entrada y las presiones en el interior, y las fuerzas de tirado necesarias para mover hacia la salida, como así también predecir tensiones residuales térmicas producidas por la diferencia de temperaturas entre cada parte del molde y la temperatura ambiente a la salida.*

*Estas predicciones se realizan variando las condiciones de trabajo, es decir, velocidades de tirado y temperaturas del molde, como también el uso de distintas resinas y fibras, y formas del molde.*

*Los resultados del modelo se comparan con datos experimentales obtenidos en la literatura.*

## INTRODUCCIÓN

El proceso de pultrusión de un termorrígido, se esquematiza en la Figura 1 y consiste en el mojado de fibras en un baño que contiene la resina y el posterior tirado de las fibras a través de un molde calefaccionado. Cuando la resina pasa por el molde, se va calentando hasta que posee la temperatura a la cual se activa la reacción química. En este momento comienza la reacción de entrecruzamiento o proceso de curado, mediante el cual pasa de ser una resina líquida a un gel. A fin de modelar este proceso se requiere del planteo de un modelo de transferencia de calor, con un submodelo cinético y uno de propiedades térmicas del compuesto.

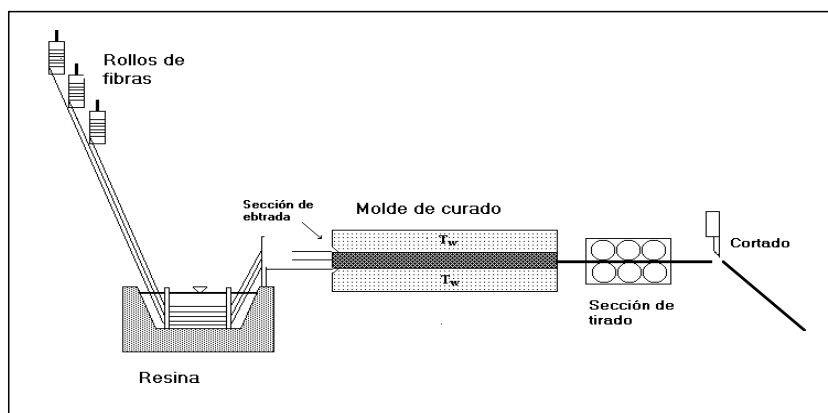


Figura 1: Esquema del proceso de pultrusión

En los últimos años se han publicado varios trabajos que presentan modelos matemáticos para describir el proceso de pultrusión. Moschiar et al.<sup>1,2</sup> presentan un análisis de cómo afectan las variables del proceso sobre el material compuesto obtenido en una pultrusión. Los trabajos desarrollan un modelo matemático resuelto por diferencias finitas, utilizando una resina poliéster y una resina epoxi como matrices. La descripción del proceso incluye el modelo para transferencia de calor, curado de la resina, presión desarrollada en el interior del molde, fuerza de tirado y en el segundo trabajo, además la predicción de las fuerzas de tirado.

Sumerak<sup>3</sup> utiliza un programa de análisis de elementos finitos comercial para resolver un modelo de transferencia de calor en tres dimensiones, en un proceso de pultrusión, teniendo en cuenta la variación del perfil de temperatura dentro del molde. Aplica el modelo a diferentes perfiles con distintos grados de complejidad.

Joshi and Lam<sup>4</sup> discuten el desarrollo y aplicación de una aproximación utilizando elementos finitos y volúmenes de control, en tres dimensiones, sobre un perfil irregular obtenido en un proceso de pultrusión. Utiliza un programa comercial de elementos finitos (LUSAS 13.0) para la transferencia de calor por conducción. La transferencia de calor entre el

molde y el compuesto que se mueve en él, la modelan usando superficies térmicas, mediante un esquema semi-numérico resuelto con códigos FORTRAN.

El objetivo de este trabajo es el modelado numérico de la transferencia de calor con sus respectivos submodelos para el caso de una resina epoxi y una resina poliéster y su verificación con datos experimentales obtenidos de un pultrusor, utilizando un programa de elementos finitos desarrollado en nuestra facultad implementado en un entorno genérico para la solución de problemas reducibles por elementos. Se pretende además realizar un estudio de las variables de proceso tales como velocidad de tirado y temperatura en la pared, a fin de encontrar las condiciones mejores de procesamiento en cuanto a la transferencia de calor.

El presente trabajo es la continuación de un proyecto de investigación en el tema de pultrusión, donde se prevé seguir estudiando las alternativas más eficientes para la simulación numérica del proceso, incluyendo estudios termomecánicos a fin de poder predecir las tensiones residuales involucradas.

## MODELO MATEMÁTICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La ecuación general de balance de calor que describe al problema es:

$$\frac{DT}{Dt} = \nabla^2 T + \rho(-\Delta H_0)\omega_r R_a \quad (1)$$

Resolviendo el problema de balance de energía con las siguientes suposiciones: 1) La conducción de calor en la dirección axial es despreciable y 2) El compuesto permanece en contacto con la pared.

Para la matriz epoxi se utilizó una simetría de revolución, mientras que para la matriz poliéster una simetría plana.

Con esas suposiciones la ecuación de balance de energía a resolver para el caso plano y para el caso de simetría de revolución presenta la forma dada por las ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho(-\Delta H_0)\omega_r R_a \quad (2)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho(-\Delta H_0)\omega_r R_a \quad (3)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del compuesto,  $C_p$  es la capacidad calorífica del compuesto,  $V_z$  es la velocidad de tirado del pultrusor,  $k$  es la conductividad térmica del compuesto en la dirección  $x$ ,  $\Delta H_0$  es el calor de reacción del polímero,  $\omega_r$  es la fracción másica de resina y  $R_a = dX/dt$  ( $X$  grado de avance de la reacción de curado o conversión) es la velocidad de reacción que es distinta para cada resina.

Con las siguientes condiciones de contorno:

Para el caso de simetría de revolución (resina epoxi):

$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq R & \quad z = 0 & \quad T = T_0 & \quad x = 0 \\ r = R & \quad 0 \leq z \leq L & \quad T = T_w = T_w(z) \\ r = 0 & \quad 0 \leq z \leq L & \quad \partial T / \partial r = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

donde R es el radio del cilindro y L es el largo del molde del pultrusor.

Para el caso de la geometría plana (resina poliéster):

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq b & \quad z = 0 & \quad T = T_0 & \quad x = 0 & \quad I_{0i} = 0 \\ x = b & \quad 0 \leq z \leq L & \quad T = T_w = T_w(z) \\ x = 0 & \quad 0 \leq z \leq L & \quad \partial T / \partial x = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

donde b es el ancho del perfil plano y L es el largo del molde del pultrusor.

Los modelos cinéticos para cada resina son los siguientes<sup>1,2</sup>:

Para la resina epoxi:

$$R_a = \frac{dX}{dt} = 2.918 \times 10^6 \exp\left(-\frac{66.013}{RT}\right) \cdot (1-X)^2 \quad [s^{-1}] \quad (6)$$

Para la resina poliéster:

$$R_a = \frac{dX}{dt} = 3.244 \times 10^5 \exp\left(-\frac{55.10}{RT}\right) \cdot (I_0 - I) \cdot (1-X) \cdot \left(1 - \frac{X}{0.9}\right) \quad [s^{-1}] \quad (7)$$

$$\frac{dI_i}{dt} = -Ad_i \exp\left(-\frac{Ed_i}{RT}\right) \cdot I_i \quad I = \sum I_i \quad (8)$$

donde los datos de los iniciadores se dan en la Tabla 1. Los iniciadores, son sustancias que permiten que la polimerización de la resina poliéster comience. En este caso se necesitó una mezcla de tres sustancias, para obtener una óptima velocidad de reacción.

Tabla 1: Datos cinéticos de los iniciadores

$I_{01} = 53.7$	$Ad_1 = 2.41 \times 10^{17}$	$Ed_1/R = 16250$
$I_{02} = 46.3$	$Ad_2 = 2.92 \times 10^{16}$	$Ed_2/R = 17100$
$I_{03} = 12.9$	$Ad_3 = 7.76 \times 10^{13}$	$Ed_3/R = 15060$

Si bien se intenta resolver el caso estacionario, el término temporal no se despreció, ya que facilita alcanzar la solución del problema en forma iterativa.

## PROPIEDADES FÍSICAS DEL COMPUESTO

En el presente trabajo se utilizaron un compuesto de matriz epoxi y otro cuya matriz es una resina poliéster insaturada. Las propiedades físicas se calcularon utilizando la regla de mezclas según las siguientes ecuaciones.

$$\rho = \phi_r \rho_r + \phi_g \rho_g + \phi_f \rho_f \quad (9)$$

$$C_p = \omega_r C_{pr} + \omega_g C_{pg} + \omega_f C_{pf} \quad (10)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{\phi_r}{k_r} + \frac{\phi_g}{k_g} + \frac{\phi_f}{k_f} \quad (11)$$

Donde  $\omega$  es la fracción másica,  $\phi$  la fracción volumétrica y los subíndices representan: r: resina, g: fibras y f: relleno. En la Tabla 2 se muestran los valores de las propiedades físicas de las resinas, las fibras y los rellenos utilizados para calcular las propiedades del compuesto.

Tabla 2: Propiedades físicas

	Poliéster	Epoxi
$\rho_r$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1100	$-0.1 \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 90 \cdot X + 1234$ ( para $X < 0.45$ ) $-0.1 \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 1234$ ( para $X > 0.45$ )
$C_{pr}$ (KJ/Kg .K)	1.883	$1.958 + 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot T(^{\circ}\text{C}) - 0.59 \cdot X$
$K_r$ (J/m .s)	0.169	$0.161 + 0.04184 \cdot ( 0.035 \cdot T(^{\circ}\text{C}) - 0.41)$
$\rho_g$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2540	2540
$C_{pg}$ (KJ/Kg .K)	0.833	0.833
$k_g$ (J/m .s)	0.866	0.866
$\rho_f$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2580	-
$C_{pf}$ (KJ/Kg .K)	0.920	-
$k_f$ (J/m .s)	1.967	-

(T: Temperatura; X: Conversión )

## MODELO NUMÉRICO

Para modelar numéricamente el proceso, se utilizó un programa en elementos finitos desarrollado en un entorno de trabajo genérico para la solución de problemas reducibles por elementos. Dicho entorno es aplicable a la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales por técnicas de Elementos Finitos, Diferencias Finitas, Volúmenes Finitos, etc., y en general, a todos aquellos problemas que se resuelven a través de sistemas de ecuaciones algebraicas, cuya matriz global pueda construirse por intermedio de contribuciones aditivas o no-aditivas realizadas por “elementos”<sup>5</sup>.

El programa esta basado en el concepto de “Elemento”, entendido como un conjunto de nodos que tienen asociados un cierto numero de incógnitas o grados de libertad y

determinadas relaciones de acoplamiento entre ellas, definidas localmente, i.e., independientemente de otros elementos. Cada nodo puede presentar un número distinto de grados de libertad, ensamblándose sólo las ecuaciones correspondientes a los grados de libertad efectivamente presentes. Las condiciones de borde pueden ser tratadas de manera convencional o como elementos especiales de contorno. La tarea fundamental del usuario consiste en configurar los datos de entrada, como por ejemplo la descripción de las mallas de nodos y elementos, y las propiedades u otras constantes físicas necesarias, y de programar la matriz elemental si esta no formase parte de la biblioteca existente. El programa basa su generalidad y versatilidad en un ensamblador simbólico y numérico de carácter general, independiente de la clase de elementos a ensamblar, el usuario debe proveer una matriz que refleje la estructura de acoplamientos entre los diferentes grados de libertad del elemento, tarea relativamente sencilla a partir de los bloques de código que se usan para calcular la matriz numérica elemental.

El sistema de ecuaciones local, es decir, para un elemento no acoplado, expresado en forma matricial es:

$$[K_{lm}] * [\alpha_m] = [B_l] \quad (12)$$

donde  $K_{lm}$  es la matriz de masas,  $\alpha_m$  es el vector de incógnitas del sistema y  $B_l$  es el vector de términos independientes. Los subíndices  $l$  y  $m$  dependen de la cantidad de grados de libertad del sistema, del orden en que se ingresaron los grados de libertad y del número de nodos del elemento. Las dimensiones de la matriz  $K_{lm}$  y de los vectores  $\alpha_m$  y  $B_l$  están determinadas por el número de grados de libertad que tiene el sistema y el número de nodos del elemento.

Los subíndices  $l$  y  $m$  están definidos por las siguientes expresiones:

$$l = \text{DofT} * (i - 1) + \text{N}^\circ\text{Dof} \quad (13)$$

$$m = \text{DofT} * (j - 1) + \text{N}^\circ\text{Dof} \quad (14)$$

donde  $\text{DofT}$  es el número total de grados de libertad que tiene el sistema,  $\text{N}^\circ\text{Dof}$  es el orden en que se ingresó el grado de libertad en el vector de incógnitas (primero  $\Rightarrow \text{N}^\circ\text{Dof} = 1$ , segundo  $\Rightarrow \text{N}^\circ\text{Dof} = 2, \dots$ , último  $\Rightarrow \text{N}^\circ\text{Dof} = \text{DofT}$ ),  $j$  es el subíndice que se utiliza para denominar las funciones de forma nodales,  $\phi_j$  ( $1, 2, \dots, \text{N}^\circ$  de nodos totales del elemento) e  $i$  es el subíndice que se utiliza para denominar las funciones de peso nodales,  $\varphi_i$  ( $1, 2, \dots, \text{N}^\circ$  de nodos totales del elemento).

Para facilitar la comprensión del proceso de ensamblaje de la matriz de masas y el vector de términos independientes se describirá dicho proceso para el caso del compuesto Poliéster-Fibra de vidrio.

En este caso es necesario resolver el problema para cinco grados de libertad, es decir,  $\text{DofT} = 5$ . Los grados de libertad se ingresaron como muestra la Tabla 3:

Tabla 3 Ingreso de los grados de libertad

NºDof	Variable	Notación abreviada
1	Temperatura	T
2	Conversión de curado	X
3	Concentración del iniciador Nº1	I1
4	Concentración del iniciador Nº2	I2
5	Concentración del iniciador Nº3	I3

Por lo tanto, para un elemento triangular de tres nodos (Nº de nodos totales del elemento = 3), el vector que almacena las incógnitas (en forma transpuesta) será:

$$\alpha_m^T = \{ T_1, X_2, I1_3, I2_4, I3_5, T_6, X_7, I1_8, I2_9, I3_{10}, T_{11}, X_{12}, I1_{13}, I2_{14}, I3_{15} \} \quad (15)$$

donde  $T_1, X_2, I1_3, I2_4$  y  $I3_5$  son las incógnitas asociadas al nodo local Nº1;  $T_6, X_7, I1_8, I2_9, I3_{10}$  están asociadas al nodo Nº2 y por último  $T_{11}, X_{12}, I1_{13}, I2_{14}, I3_{15}$  están asociadas al nodo Nº3. Nótese que los subíndices  $m$  responden a la ecuación (14).

Los términos de la matriz elemental y del vector de términos independientes son obtenidos por bucles sobre los puntos de gauss, integral sobre el elemento de las ecuaciones constitutivas que describen a cada grado de libertad. Estas integrales, obviamente, no son las mismas para todos los grados de libertad.

Los valores de  $K_{lm}$  y  $B_l$  que describen el problema térmico (NºDof=1) son:

$$K_{lm} = \int \rho C_p \frac{\phi_j}{\Delta_t} \varphi_i + \int \rho C_p V_z \frac{\partial \phi_j}{\partial z} \varphi_i + \int k \frac{\partial \phi_j}{\partial x} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \quad (16)$$

$$B_l = \sum_{j=1}^{NodT} \left\{ \int \rho C_p \frac{\phi_j}{\Delta_t} \alpha_m^{(n-1)} \varphi_i + \int g \varphi_i \right\} \quad (17)$$

siendo:

$$g = \rho (-\Delta H_0) \omega_r R_a \quad (18)$$

$$\varphi_j = \phi_j + \frac{h}{2|V|} (V \cdot \nabla \phi_j) \quad (19)$$

Donde NodT es el número total de nodos del elemento,  $\Delta_t$  es el paso de tiempo,  $g$  es la fuente de calor,  $\phi_j$  es la función de forma asociada al nodo  $j$ ,  $\varphi_i$  es la función de peso asociada al nodo  $i$ ,  $\alpha_m^{(n-1)}$  es el valor de la temperatura en el nodo  $j$  calculado en el paso de tiempo anterior,  $h$  es la dimensión del elemento proyectada sobre la dirección de  $V$ , donde  $V$  es el vector de velocidades.

Los valores de  $K_{lm}$  y  $B_l$  que describen la conversión (NºDof=2) son:

$$K_{lm} = \int \frac{\phi_j}{\Delta_t} \varphi_i + \int V_z \frac{\partial \phi_j}{\partial z} \varphi_i \quad (20)$$

$$B_l = \sum_{j=1}^{NodT} \left\{ \int \frac{\phi_j}{\Delta_t} \alpha_m^{(n-1)} \varphi_i + \int R_a \varphi_i \right\} \quad (21)$$

Donde  $\alpha_m^{(n-1)}$  es el valor de la conversión en el nodo  $j$  calculado en el paso de tiempo anterior.

Los valores de  $K_{lm}$  y  $B_l$  que describen las concentraciones de los iniciadores ( $N^\circ Dof = 3, 4$  o  $5$ ) son:

$$K_{lm} = \int \frac{\phi_j}{\Delta_t} \varphi_i + \int V_z \frac{\partial \phi_j}{\partial z} \varphi_i \quad (22)$$

$$B_l = \sum_{j=1}^{NodT} \left\{ \int \frac{\phi_j}{\Delta_t} \alpha_m^{(n-1)} \varphi_i + \int R_{ln} \varphi_i \right\} \quad (23)$$

Donde  $\alpha_m^{(n-1)}$  es el valor la concentración del iniciador en el nodo  $j$  calculado en el paso de tiempo anterior y  $R_{ln}$  es la velocidad de consumo del iniciador  $N^\circ n$  ( $dln/dt$ ).

Los términos  $R_a$  y  $R_{ln}$  son funciones complejas de la temperatura, la conversión y las concentraciones de los iniciadores (ver ecuaciones (7) y (8)) y se recalculan, dentro del mismo paso de tiempo, con las soluciones de las variables en la iteración anterior. De esta manera el sistema alcanza la solución dentro de un paso de tiempo haciendo una iteración no-lineal hasta alcanzar un error mínimo determinado por el usuario del programa. Una vez alcanzada la solución dentro de un paso de tiempo, la solución del paso de tiempo actual pasa a ser la solución del paso de tiempo anterior y se repite el proceso iterativo antes descrito hasta finalizar el tiempo de cálculo.

Para el caso de la resina epoxi se trabaja con tres grados de libertad menos, porque la reacción química no necesita iniciadores para comenzar. Por lo tanto las ecuaciones (22) y (23) no se tienen en cuenta.

## GEOMETRÍA Y MALLA UTILIZADA

Se modeló un perfil rectangular de dimensiones 0.375in x 0.625in para un compuesto de resina poliéster y un 63% en peso de fibra de vidrio ( $W_g = 0.63$ ). La velocidad de tirado en este caso es de 0.00508 m/seg. En este trabajo se utilizó un mallador de triángulos equiláteros del tipo "frente de generación"<sup>8,9</sup>, con refinamiento adaptativo, partiendo de una malla inicial de triángulos rectángulos mostrada en la Figura 2a.

Se desarrolló un refinador automático de mallas dado que durante el proceso de pultrusión, para el caso de algunas resinas y para ciertas geometrías, se producen reacciones muy rápidas localizadas en zonas de pequeño tamaño, involucrando cambios de gran magnitud en las variables, con los consiguientes fuertes gradientes. Para que estos cambios



puedan ser modelados con exactitud es necesario implementar un criterio para determinar el tamaño de elemento en función de las variables o sus derivadas, densificando localmente

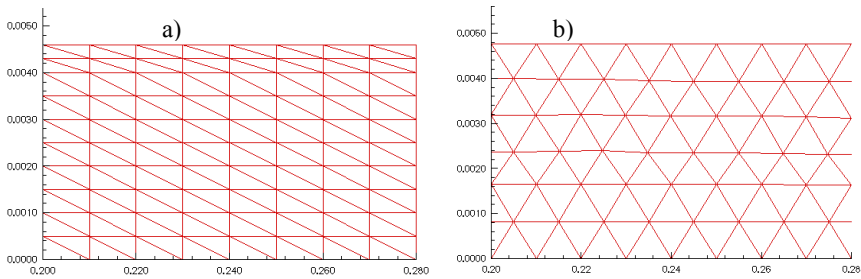


Figura 2: Mallas utilizadas: a) Triángulos rectángulos b) Triángulos equiláteros

Dado que la implementación se realizó con elementos lineales, el criterio de densificación adoptado fue la de minimizar los errores locales de interpolación. Como indicador del error local se utilizó la derivada segunda en cada nodo<sup>10</sup>. La derivada segunda se recuperó interpolando por cuadrados mínimos un paraboloides con las variables de los nodos vecinos.

El mallador genera una malla de triángulos casi equiláteros (equiláteros cuando es posible), como se mencionó anteriormente, a través de la técnica de “Frente de Generación”. Inicialmente el frente de generación coincide con el contorno de la geometría que se define como uno o varios polígonos cerrados con una orientación determinada. El tamaño del Elemento a generar se determina en función de valores asignados previamente a los nodos en la grilla existente con el procedimiento antes descrito.

En las Figuras 3 a, b y c se muestra la evolución de la malla de elementos finitos en los sucesivos refinamientos

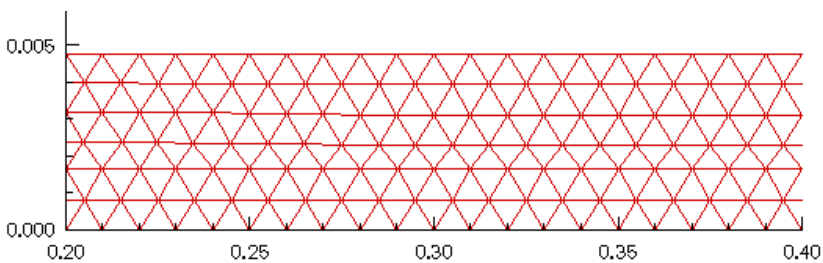


Figura 3 a): Primer refinamiento(353 nodos y 594 elementos )

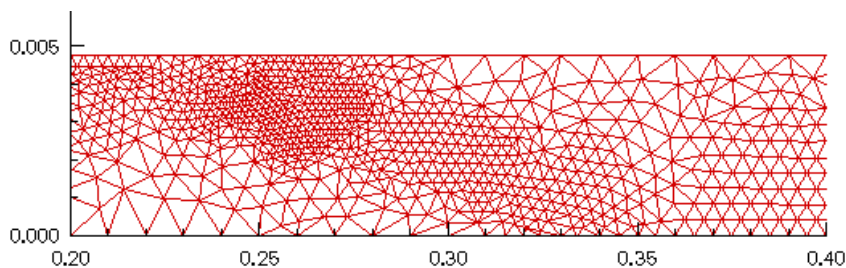


Figura 3 b): Segundo refinamiento(1151 nodos y 2158 elementos )

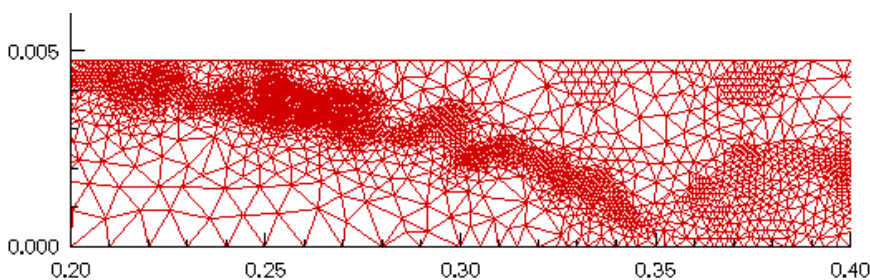


Figura 3 c): Tercer refinamiento(3986 nodos y 7738 elementos )

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se pueden ver los datos experimentales de Sumerak<sup>3</sup> de la temperatura en el centro del perfil en función de la posición en el molde para el caso de un compuesto de resina poliéster y un 63% en peso de fibra de vidrio ( $W_g = 0.63$ ). Se representa además la temperatura simulada en el centro de un perfil rectangular de dimensiones 0.375in x 0.625in para tres velocidades de tirado diferentes (VEL1 = 0.00508 m/seg; VEL2 = 0.01016m/seg; VEL3 = 0.01524m/seg). Las líneas continuas representan las simulaciones y los puntos las mediciones experimentales.

De la misma manera que lo mostraron Moschiar et al<sup>1</sup> resolviendo el sistema en diferencias finitas, este modelo numérico también predice satisfactoriamente el perfil de temperaturas, donde las temperaturas de los picos y su ubicación en el molde están dentro del error experimental.

En las Figuras 5 y 6 se representan la temperatura experimental de Hunter<sup>4</sup> del centro de una barra circular de  $\varnothing = 12.7$  mm para un compuesto de matriz epoxi con 85% de fibras de vidrio en peso, junto con la variación de la temperatura simulada por el modelo del centro de la barra en función de la posición del molde para dos perfiles de temperatura de pared diferentes ( $T_w = F(I)$  y  $T_w = F(II)$  (2)) y una velocidad de tirado  $V_z = 0.00508$  m/s.

La correspondencia entre el modelado numérico y los datos experimentales es también buena como en el caso del compuesto de poliéster.

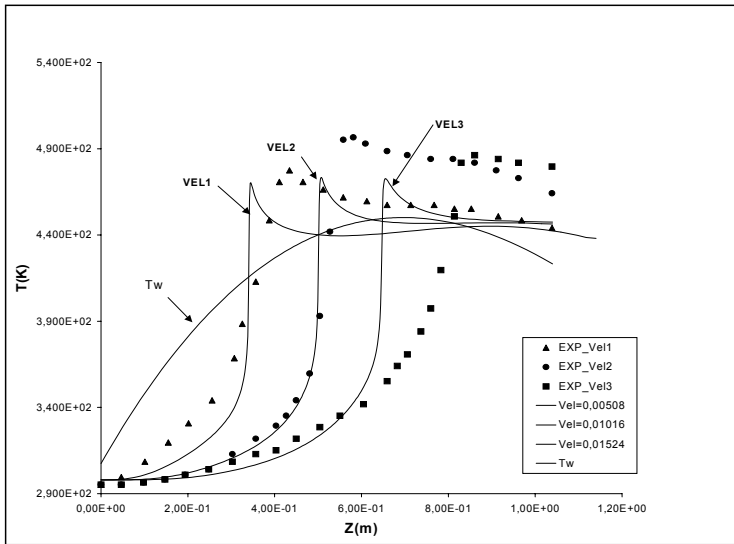


Figura 4: Perfil de temperatura a lo largo del molde para una resina poliéster

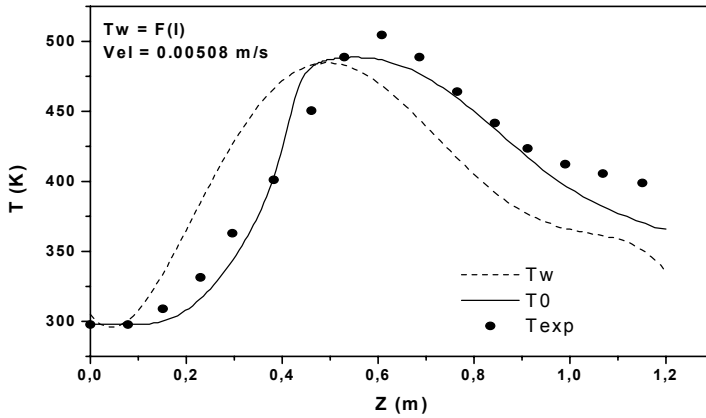


Figura 5: Perfil de temperatura para una resina epoxi para  $T_w=F(l)$

Estos resultados satisfactorios, nos permiten utilizar este modelado numérico para la predicción de las tensiones residuales térmicas de las piezas, de las presiones internas y de las fuerzas de tirado que son función del perfil de temperaturas obtenido, para distintas geometrías y distintos compuestos.

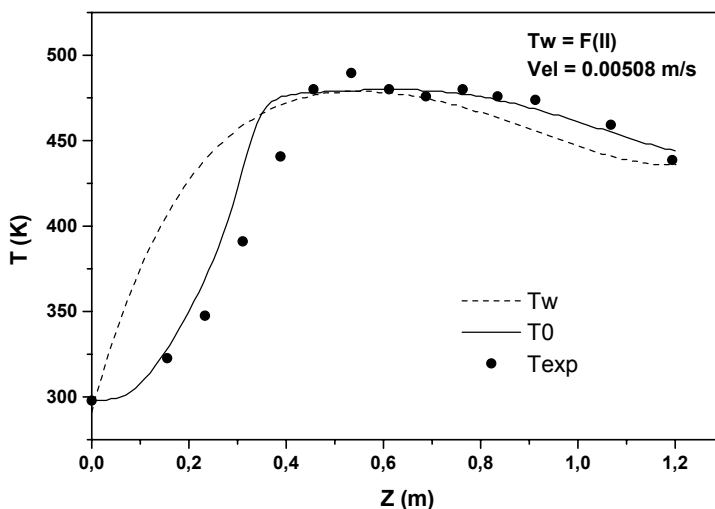


Figura 6: Perfil de temperatura para una resina epoxi para  $T_w=F(II)$

## CONCLUSIONES

Se realizó la resolución numérica por el método de elementos finitos del modelo de transferencia de calor en un proceso de pultrusión para dos compuestos diferentes. Los resultados obtenidos están en buen acuerdo con los datos experimentales, lo que permitirá utilizarlo para la predicción de propiedades termomecánicas.

## REFERENCIAS

[1] Moschiar S.M.; Reboledo M.M.; Kenny J.M. and Vazquez A., "Analysis of pultrusion processing of unsaturated polyester resin with glass fibers", Polymer Composites Vol 17 (3), p.p.478 (1996)

- [2] S.M. Moschiar, M.M. Reboredo, H. Larrondo. and A. Vazquez, “Pultrusion of epoxy matrix composites. Pulling force model and thermal stress analysis”, *Polymer Composites* Vol.17 (6) (1996)
- [3] J.E. Sumerak, “Pultrusion die design optimisation opportunities using thermal finite element analysis techniques”, 19th Annual Conference, Composite Institute. The Society of the Plastics Industry, Inc. ( Feb, 1994)
- [4] S.C. Joshi and Y.C. Lam, “Three-dimensional finite-element/nodal-control-volume simulation of the pultrusion process with temperature-dependent material properties including resin shrinkage”, *Composites Science and Technology*, 61, p.p. 1539-1547 (2001).
- [5] O.C. Zienkiewicz., *El método de los elementos finitos* (Edición en español) Ed. Reverté, S.A. (1980).
- [6] J.E. Sumerak, *Revista de Plásticos Modernos*, Feb. 1986, p. 356
- [7] G.A. Hunter, 43rd Annual Conf. Composites Institute, The Society of Plastics Industry (February 1986)
- [8] Paul Louis Geroge & Eric Seveno, “The advancing-front mesh generation method revisited”. *International Journal Num. Meth. In Engineering*, 37, 3605-3619 (1994).
- [9] E. Dari, M.Venere,R.Feijoo, “Finite element 3-Dmesh generation using the advancing Front technic”, *Mecánica Computacional*, S. Idhelson,V.Sonzogni ed.,14, 512-519, AMCA, Sta Fé, Argentina (1994).
- [10] O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor, *The finite element method*, McGraw Hill, Vol. III “Fluid Dynamics”, 5ta Ed. (1999)