

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA INYECCIÓN DE ENVAINADOS EN ACERO LÍQUIDO

Víctor D. Fachinotti y Alberto Cardona

Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC-INTEC), Universidad Nacional del Litoral – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Güemes 3450, Santa Fe, Argentina, <http://www.cimec.org.ar>.

Palabras Clave: Inyección de envainados, elementos finitos, dominio fijo.

Resumen. Se estudia el proceso de inyección de envainados en acero líquido. El problema es gobernado por la ecuación de calor con cambio de fase en un único dominio, que constituido de tres elementos: el relleno o aditivo, su vaina, y el baño de acero. La solución del problema se obtiene numéricamente usando el método de elementos finitos a malla fija. La transferencia de calor a través de la interfase entre la cáscara solidificada alrededor de la vaina y el baño líquido se modela por medio de una fuente interna de calor. Finalmente, los resultados numéricos son comparados con datos experimentales, mostrando una concordancia satisfactoria.

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por objetivo simular el proceso de inyección de envainados para el aporte de aditivos al acero líquido.

La Figura 1 muestra el sistema a modelar, que consta del envainado o alambre relleno (“cored wire”), consistente a su vez en el aditivo envuelto en una vaina de acero, y del baño de acero. A diferencia de lo observado por Sanyal et al (2004), observaciones experimentales del proceso en estudio excluyen la formación de una capa de escoria entre el envainado y el baño, así como el desarrollo de una fase gaseosa interpuesta entre la vaina y el baño actuando como resistencia al flujo térmico entre ambos.

La técnica de inyección de envainados permite liberar aditivos a una cierta profundidad dentro del baño de acero líquido. Con este proceso se logran reducir o eliminar efectos perniciosos como la interacción del aditivo con la escoria o la evaporación prematura del aditivo. También es deseable liberar el aditivo a una profundidad tal dentro del baño, que el tiempo de residencia del aditivo sea máximo.

Cuando se inyecta un aditivo envainado, originalmente a temperatura ambiente, dentro del baño de acero, se forma alrededor de la vaina una cáscara solidificada de material proveniente del baño. Dicha cáscara crece hasta alcanzar un espesor máximo, luego comienza a fundirse hasta dejar la vaina al descubierto. Ésta se funde a continuación, liberándose recién en este momento el aditivo en la masa de acero líquido.

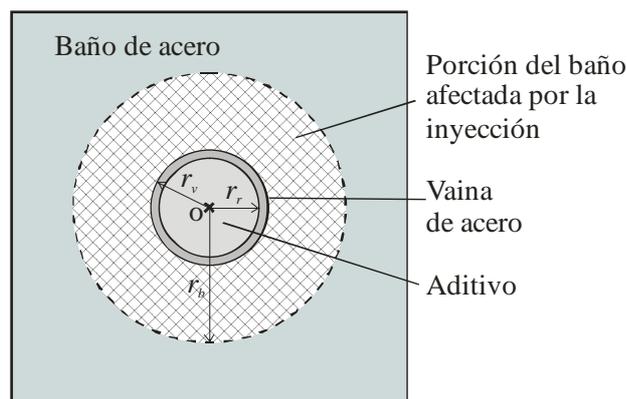


Figura 1: Esquema del problema de inyección de envainado en el baño de acero líquido.

2 MODELO MATEMÁTICO

El análisis del proceso de inyección se hará usando un método de dominio fijo. En este caso, las condiciones de balance de energía sobre el frente de solidificación están implícitas en la ecuación de gobierno del problema, y no necesitan tratarse como condiciones de borde. Este modelo, a diferencia de los de malla móvil usados previamente en estudios de este tipo (Sanyal et al, 2004), permite modelar no sólo cambio de fase isotérmico (propio de metales puros) sino también pastoso (propio de aleaciones), residiendo aquí una de las ventajas con respecto a los trabajos anteriores.

En consecuencia, tenemos un único dominio de análisis, Ω , que incluye todas las partes del problema, a saber: el relleno, su vaina y el baño. Puesto que la carga térmica del envainado es muy inferior a la del baño, no es necesario incluir la totalidad del baño en Ω , sino el volumen contenido en un cilindro (ficticio) alrededor de la vaina, con un diámetro suficientemente mayor a la dimensión transversal de la vaina (del orden de 10 veces).

Así, para envainados de sección circular, el dominio Ω presenta simetría axial. Si además

tenemos en cuenta que la componente axial (en la dirección del eje de envainado) del flujo de calor es despreciable con respecto a la componente radial, el dominio de análisis consistirá de una sección transversal del envainado y del baño. Esta simplificación, sumado a la simetría axial, torna al problema unidimensional, de modo que el dominio de análisis se reduce al intervalo $\Omega = (0, r_b)$, donde $r = 0$ corresponde al eje de simetría, y r_b es el radio exterior de la porción de baño considerada (ver Figura 1).

Luego, la ecuación de balance de energía que gobierna la evolución de la temperatura T con el tiempo t en el dominio de análisis Ω se expresa como

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \lambda \frac{\partial f_l}{\partial t} - \text{div}(k \text{ grad } T) + q = 0 \quad \text{para } 0 < r < r_b, t > 0, \quad (1)$$

donde $\rho = \rho(T)$ es la densidad, $c_p = c_p(T)$ el calor específico, λ el calor latente de fusión, $f_l = f_l(T)$ la fracción de líquido ($f_l = 1$ en el líquido, $f_l = 0$ en el sólido y $0 < f_l < 1$ en la fase pastosa), $k = k(T)$ la conductividad térmica, y $q = q(T)$ una fuente interna de calor. Cada parte dentro de Ω , i.e., relleno, vaina y baño, se identifica por sus propiedades materiales. La ecuación (1) está sujeta a las condiciones de borde

$$\text{grad } T = 0 \quad \text{para } r = 0, r = r_b, t > 0. \quad (2)$$

(implicando simetría a $r = 0$ y temperatura del baño constante a partir de $r = r_b$), e iniciales

$$\begin{aligned} T &= T_{amb} \quad \text{para } 0 \leq r \leq r_v, t = 0, \\ T &= T_{baño} \quad \text{para } r > r_v, t = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

2.1 Modelo de la convección en el baño

La ecuación (1) gobierna la transferencia de calor debida a mecanismos de conducción unicamente. Es bien sabido que el flujo del metal líquido en el baño incrementa el flujo de calor hacia las regiones sólidas, y ello es más pronunciado en régimen turbulento. En un modelo de conducción de calor como el presente, tal incremento del flujo por convección de calor suele aprehenderse de dos maneras:

- 1) Imponiendo la condición de convección a un fluido exterior (el baño) a través del frente de liquidus en el baño (ubicada a $r = r_l$):

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_{baño} - T) \quad \text{para } r = r_l, t > 0, \quad (4)$$

donde h es el coeficiente de transferencia de calor en la interfase, a determinar. Esta es la opción usual en los modelos de malla móvil, donde la ecuación (4) representa una condición de borde. Sin embargo, cuando se usan modelos de malla fija, el frente de liquidus en el baño está inmerso en el dominio de análisis, esto es, no forma parte de su frontera, y por tanto la ecuación (4) no constituye una condición de borde. En este caso, será tratada como una fuente de calor interna en forma de pulso aplicada en el punto $r = r_l$, o sea:

$$q = h(T_{baño} - T)\delta(r - r_l) \quad \text{para } 0 < r < r_b, t > 0, \quad (5)$$

donde δ denota la función delta de Dirac.

Siguiendo a Sanyal et al (2004), el coeficiente de transferencia de calor h queda

determinado por

$$\text{Nu} = \frac{hH}{k} = \begin{cases} 0.4 \text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{0.453} & \text{para } \text{Re} < 10^4, \\ 0.0296 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.33} & \text{para } \text{Re} > 10^5, \end{cases}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V_{iny} H}{\mu}, \quad (6)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{k},$$

donde Nu, Re y Pr son los números de Nusselt, Reynolds y Prandtl en el baño de acero líquido, H su altura, k su conductividad, ρ su densidad, c_p su calor específico, μ su viscosidad dinámica, y V_{iny} es la velocidad de inyección del envainado. Para valores de Re entre 10^4 y 10^5 , Nu se obtiene por interpolación lineal.

Cabe destacar que la ecuación (5) incluye al flujo de calor por conducción a través de la interfase, de modo que al usar métodos de dominio fijo, la conductividad a asignar al baño líquido deberá ser de valor despreciable (aunque no nulo, puesto que ello originaría problemas en el análisis numérico).

- 2) El incremento del flujo calórico por convección en el baño líquido también puede modelarse aumentando artificialmente la conductividad del líquido con respecto al valor usual, correspondiente al líquido en reposo. Esta opción se presta perfectamente al uso de un modelo de malla fija, con sólo considerar en el baño una conductividad dependiente de la temperatura, con valores aumentados artificialmente para temperaturas superiores a la temperatura de liquidus del baño.

Pueden encontrarse datos para definir la magnitud de la conductividad aumentada en el molde de colada continua (Choudhary y Mazumdar, 1995), pero no sucede lo mismo en condiciones de inyección de envainados. Se necesita mayor información para la aplicación del modelo de conductividad aumentada en este contexto, por lo que no será usado en este trabajo.

3 MODELO NUMÉRICO

En primer lugar, se integra la ecuación (1) en el intervalo de tiempo $[t_0, t]$ usando el esquema de Euler implícito, obteniendo:

$$\rho c_p \frac{T - T^0}{\Delta t} + \rho \lambda \frac{f_l - f_l(T^0)}{\Delta t} - \text{div}(k \text{grad} T) + q = 0 \quad \text{para } 0 < r < r_b, \quad (7)$$

donde $\Delta t = t - t_0$ es el tamaño del paso de tiempo, y T^0 la distribución de temperaturas al instante previo t_0 , supuesta conocida. La misma está definida por la condición inicial (3) para el primer paso de tiempo de cálculo, i.e. $[0, \Delta t]$.

Planteamos luego la forma débil del problema definido por la ecuación de balance (7) sujeta a las condiciones de borde (2), a saber: encontrar T tal que

$$\int_{\Omega} \rho c_p \frac{T - T^0}{\Delta t} \varphi dV + \int_{\Omega} \rho \lambda \frac{f_l - f_l(T^0)}{\Delta t} \varphi dV + \int_{\Omega} k \text{grad} T \text{grad} \varphi dV + \int_{\Omega} q \varphi dV = 0 \quad (8)$$

para toda función de peso admisible φ .

El uso del MEF implica discretizar Ω en una grilla de n nodos, y aproximar luego la incógnita T como

$$T(r, t) = \sum_{i=1}^n N_i(r) T_i(t), \quad (9)$$

donde T_i es la temperatura en el nodo i , y N_i la función de forma asociada al nodo i , que toma valor unitario en dicho nodo, y nulo en todos los demás.

Si además se adoptan como funciones de peso φ las mismas funciones de forma N_i (esto es, la formulación estándar), la ecuación (8) da lugar a un sistema de n ecuaciones con n incógnitas, cuya expresión matricial es

$$R_i = C_{ij} \frac{T_j - T_j^0}{\Delta t} + K_{ij} T_j + \frac{L_i - L_i^0}{\Delta t} + Q_i = 0, \quad (10)$$

donde C_{ij} es la matriz de capacitancia, K_{ij} es la matriz de conductividad, L_i es el vector de calor latente, y Q_i es el de fuente interna de calor, cada uno de ellos definidos por

$$\begin{aligned} C_{ij} &= 2\pi \int_{\Omega} \rho c_p N_i N_j dr, \\ K_{ij} &= 2\pi \int_{\Omega} k \frac{dN_i}{dr} \frac{dN_j}{dr} dr, \\ L_i &= 2\pi \int_{\Omega} \rho \lambda f_l N_i dr, \\ Q_i &= 2\pi \int_{\Omega} q N_i dr, \end{aligned} \quad (11)$$

teniendo en cuenta que $dV = 2\pi dr$ en problemas axisimétricos unidimensionales.

En este problema, donde se esperan fuertes gradientes térmicos en el baño a proximidad del alambre, el espesor de la zona pastosa es muy reducido. El cálculo de las integrales que involucren propiedades que presenten un fuerte salto en esa zona, con f_l como caso típico, puede ser muy impreciso si se usa la técnica de integración numérica con puntos de muestreo cuya localización es estipulada a priori. Por ello se recurre a la técnica de integración discontinua (Fachinotti et al, 1999), calculando por ejemplo L_i como

$$L_i = 2\pi \int_{\Omega_p} \rho \lambda f_l N_i dr + 2\pi \int_{\Omega_l} \rho \lambda N_i dr, \quad (12)$$

donde Ω_m y Ω_l denotan respectivamente las subregiones pastosa y líquida del dominio Ω .

La termo-dependencia de la propiedades térmicas, y en mayor medida, la presencia del término de calor latente debido al cambio de fase, tornan la ecuación (6) fuertemente no lineal. Su solución se obtiene iterativamente por el método de Newton-Raphson.

4 APLICACIÓN

El modelo desarrollado se aplica al estudio de la inyección de envainados de 16 mm de diámetro (este es el diámetro nominal, correspondiente al diámetro del relleno). El espesor de la vaina de acero es de 0.4 mm. Se supone que el baño de acero se ve afectado por la inyección hasta una distancia de 10 cm del eje de simetría.

Los datos experimentales provienen de un ensayo de inmersión realizado por el Instituto Argentino de Siderurgia (Brandaleze y Martín, 2006). Se sumerge el envainado hasta una profundidad $H = 26.5$ cm, y se lo extrae después de un cierto tiempo, midiendo la longitud Δ de la porción de alambre que se ha fundido en el transcurso de la inmersión. Los resultados se muestran en la Figura 2. Con ellos, podemos ubicar el tiempo t_f de fusión de la vaina, y por ende, de liberación del aditivo, entre 4 y 6 s.

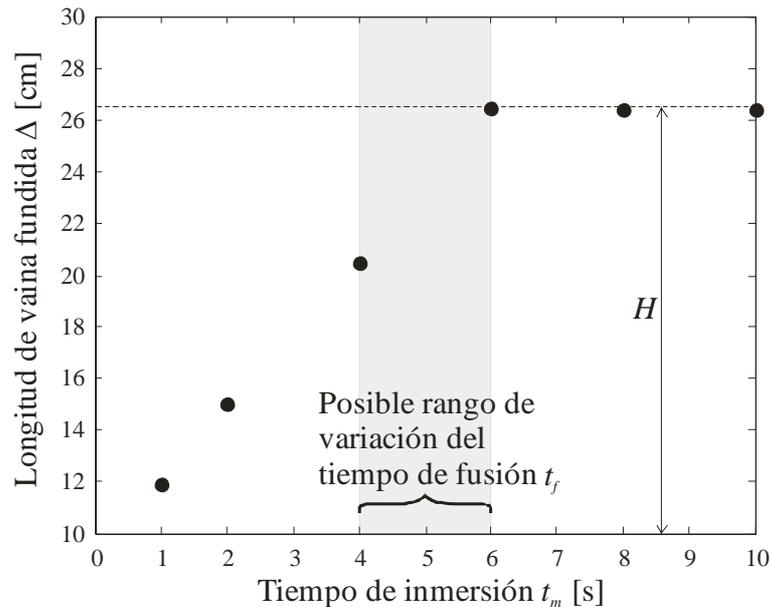


Figura 2: Resultados del ensayo de inmersión de envainado en acero líquido.

Para la simulación numérica, se emplean elementos finitos de barra lineales (esto es, las funciones de forma dentro de cada elemento varían linealmente), de tamaño 0.05 mm, mientras se fija el paso de tiempo en 0.1 s. El coeficiente de transferencia de calor entre la cáscara solidificada y el baño se calculó usando la ecuación (6) asumiendo $V_{iny} = 1$ m/s.

La Figura 2 muestra el espesor de la cáscara solidificada calculado, comprendiendo ésta tanto la capa del baño de acero formada alrededor de la vaina como la vaina misma. En el instante t_f en que dicho espesor se anula, se produce finalmente el efecto deseado de liberación del aditivo en el acero líquido. Dicho instante se estima numéricamente en 5.38 s, esto es, dentro del rango esperado a partir de la experiencia.

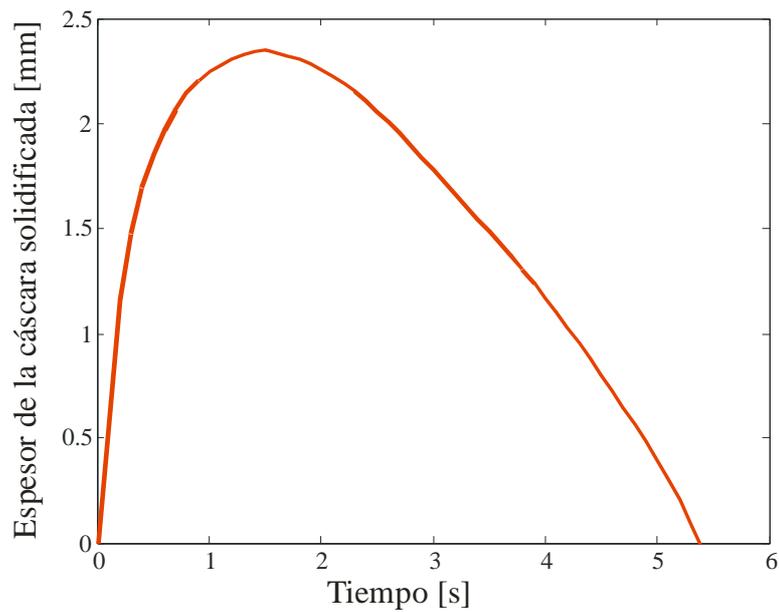


Figura 3: Evolución de la cáscara solidificada durante la inyección de envainado.

Este análisis también puede predecir en qué estado es liberado el aditivo, observando la fracción de líquido en el relleno al instante t_f (Figura 4). Se observa que el aditivo se libera en parte en estado sólido y en parte en estado líquido. Remarcamos el carácter preliminar de este resultado, por cuanto no ha podido ser contrastado con observaciones experimentales.

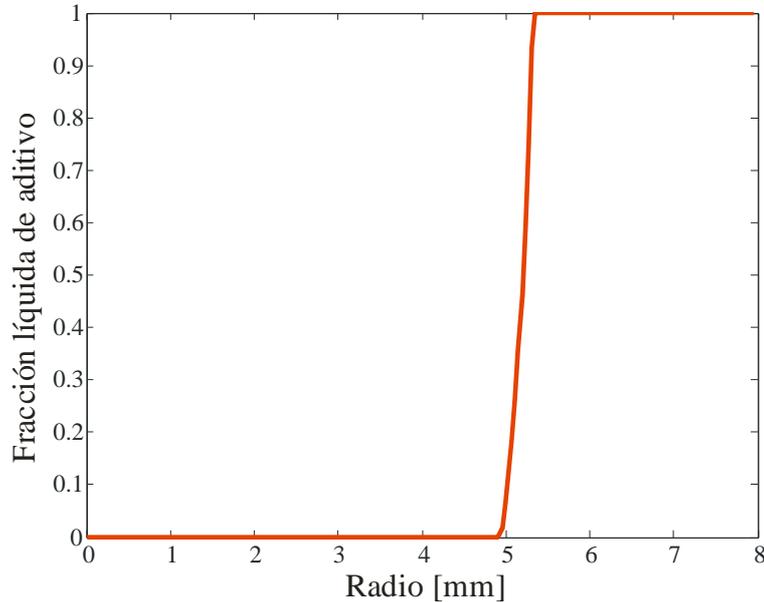


Figura 4: Perfil de fracción líquida en el relleno al instante de su liberación.

5 CONCLUSIÓN

Se ha desarrollado un modelo para el análisis por elementos finitos de procesos de inmersión de envainado en un baño de acero líquido. Se trata de un modelo de malla fija, donde el flujo de calor entre la cáscara solidificada y el baño líquido se simula por medio de una fuente interna de calor aplicada en la interfase. A diferencia de los modelos propuestos previamente en la literatura, capaces de modelar sólo solidificación isotérmica, aquí se tiene

en cuenta cambio de fase pastoso, lo que permite mejorar la caracterización de la solidificación de aleaciones, tal el caso del aditivo y el acero.

La concordancia entre resultados numéricos y experimentales es satisfactoria en cuanto al tiempo de fusión estimado.

REFERENCIAS

- E. Brandaleze, A. Martín. Ensayo de inmersión de envainados. Comunicación privada, Instituto Argentino de Siderurgia (IAS), junio 2006.
- S. K. Choudhary, D. Mazumdar. Mathematical modelling of fluid flow, heat transfer and solidification phenomena in continuous casting of steel. *Steel Research*, 66:199-205, 1995.
- V. D. Fachinotti, A. Cardona, A. E. Huespe. A fast convergent and accurate temperature model for phase-change heat conduction. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 44:1863–1884, 1999.
- S. Sanyal, S. Chandra, S. Kumar, G. G. Roy. An improved model of cored wire injection in steel melts. *ISIJ International*, 44:1157-1166, 2004.
- L. Zhang, F. Oeters. Mathematical modelling of alloy melting in steel melts. *Steel research*, 70:128-134, 1999.