

ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS Y DE LOS PARÁMETROS TÉRMICOS DURANTE LA SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL HORIZONTAL DE ALEACIONES Zn-Al HIPEREUTÉCTICAS

S. F. Gueijman, A. E. Candia⁽²⁾, A. J. Barbaro⁽²⁾ y A. E. Ares^(1,2)

(1) Investigador de la CIC - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Av. Rivadavia 1917, (1033) Capital Federal, Argentina.

(2) Programa de Materiales, Modelización y Metrología. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Félix de Azara 1552, (3300) Posadas-Misiones, Argentina.

E-mail (autor de contacto): aares@fceqyn.unam.edu.ar

RESUMEN

Los objetivos generales del presente trabajo son los de estudiar el comportamiento de los parámetros térmicos (velocidades de enfriamiento, gradientes de temperatura y velocidades de las interfases), analizando las macroestructuras y las microestructuras obtenidas a fin de relacionarlos con las propiedades de las aleaciones Zn-10%Al, Zn-15%Al, Zn-17,2%Al y Zn-27%Al cuando son solidificadas en forma unidireccional horizontal mediante la extracción calórica en dos sentidos opuestos.

Para la obtención de las probetas se usaron crisoles de arcilla, con la aleación en cuestión, los cuales se colocaron en un horno horizontal y se registra la temperatura en función del tiempo durante la solidificación de la misma.

La temperatura del horno se eleva hasta aproximadamente unos 600°C-700°C dependiendo de la concentración de Al en la aleación hasta lograr nuevamente la fusión de la misma y luego se enfría direccionalmente mediante dos enfriadores horizontales hasta completar la solidificación.

Se obtuvieron probetas de Zn-Al con forma de segmentos cilíndricos, con una longitud promedio de entre 13 cm-13,5 cm, un ancho promedio de entre 3 cm-3,2 cm y un espesor promedio de entre 0,8 cm – 1 cm dependiendo de la experiencia.

Se determinaron las posiciones, velocidades y aceleraciones de cada una de las interfases presentes y se relacionaron con las estructuras finales producto de la solidificación. Además, se relacionan las velocidades promedio de crecimiento de la macroestructura, estimadas a partir de mediciones de tamaños promedios dendríticos y de los espaciados de eutécticos, con las velocidades de las diferentes interfases. Para las aleaciones consideradas se determinó la relación $(dT/dx)/(dT/dt)^{1/2}$.

Tópico 2: Materiales Metálicos

Palabras clave: Solidificación direccional, aleaciones Zn-Al hipereutécticas, ZA 27, Niyama.

1. INTRODUCCIÓN

El criterio de Niyama es un parámetro térmico local que es de uso muy frecuente en software de modelización de solidificación de aleaciones y que frecuentemente es utilizado para predecir defectos de porosidad en fundiciones de acero [1]. Estudios adicionales muestran que el criterio de Niyama para determinar macro y micro porosidad también podría ser aplicado a otras aleaciones

diferentes a las de acero, como por ejemplo a las aleaciones de aluminio A356 y las de aluminio magnesio AZ91D, aunque no se han encontrado validaciones con datos experimentales [2].

Según Beckermann [1], se debe asegurar que los números de Niyama sean evaluados a una de temperatura específica (por ejemplo, 10 % del intervalo de solidificación por encima de la temperatura de solidus, ó el 90% de la fracción solidificada). En el presente trabajo se determinan los números de Niyama a partir de los datos experimentales de temperatura-tiempo-distancia para probetas zinc-aluminio solidificadas unidireccionalmente con dos sentidos de extracción calórica en un dispositivo horizontal para cuatro aleaciones de zinc-aluminio en el rango hipereutéctico ZA-10, ZA-15 y ZA-17,2 y para una aleación del tipo ZA-27. Los números de Niyama de dichas aleaciones se evaluaron tanto en la zona líquida, en la zona pastosa, en la zona de solidificación eutéctica y en el sólido, determinándose funciones que representan a cada proceso en función del tiempo y de la posición, correlacionándose los con las velocidades y aceleraciones de las interfaces y con la macroporosidad observada luego de concluida la solidificación.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se prepararon aleaciones zinc-aluminio hemcilíndricas de las siguientes concentraciones: ZA-10, ZA-15, ZA- 17.2 y ZA-27. Las aleaciones se solidificaron en crisoles de arcilla en un horno horizontal con un sistema de enfriamiento unidireccional que permite el enfriamiento simultáneo de los extremos de las probetas a velocidades de enfriamiento similares o diferentes [3, 4]. La temperatura del horno se eleva hasta aproximadamente unos 600°C-700°C dependiendo de la concentración de Al en la aleación hasta lograr la fusión de la misma y luego se enfría direccionalmente mediante dos enfriadores horizontales hasta completar la solidificación.. Las tres primeras aleaciones se solidificaron enfriando a similares velocidades de enfriamiento desde cada uno de los extremos, mientras que la aleación ZA-27 se enfrió con una velocidad de enfriamiento mayor desde un extremo (el extremo izquierdo) que desde el otro extremo, produciendo una asimetría preferencial en el perfil térmico de la aleación. Las temperaturas se midieron con termocuplas del tipo K envainadas en pequeños tubos de vidrio Pyrex® que se localizaron longitudinalmente en las probetas y que se situaron a una distancia equiespaciada de aproximadamente ~2 cm. A partir de los datos de temperatura-tiempo-posición así obtenidos se determinaron los siguientes variables en función tanto del tiempo cuanto de la posición longitudinal,

las velocidades de enfriamiento $\frac{dT}{dt}(\alpha, t)$ para la posición de cada termocupla, los gradientes de

temperatura $\frac{dT}{dx}(\alpha, t)$ entre cada par de termocuplas adyacentes. Dado que las solidificaciones se

efectuaron en forma unidireccional y con dos sentidos de extracción calórica predominante se producen pares de interfaces que avanzan en sentidos contrario a medida que progresa la solidificación. Para cada par de interfaces se determinaron además las velocidades de cada una de las interfaces $V_i^j(\alpha, t)$; $V_L(\alpha, t)$ para las interfaces (líquido)/(sólido + líquido) ó interfaces [L/(S+L)], $V_E(\alpha, t)$ para las interfaces (sólido + líquido)/(eutéctico + líquido) ó interfaces [(S+L)/(E+L)] , $V_S(\alpha, t)$ para las interfaces (eutéctico + líquido)/(sólido) ó interfaces [(E+L)/S], así como sus aceleraciones $a_i^j(\alpha, t)$; $a_L(\alpha, t)$ para las interfaces [L/(S+L)], $a_E(\alpha, t)$ para las interfaces [(S+L)/(E+L)] y $a_S(\alpha, t)$ para las interfaces [(E+L)/S]. Finalmente se determinó la relación

$Ny(\alpha, t) = \frac{\left| \frac{dT}{dx} \right|}{\sqrt{\left| \frac{dT}{dt} \right|}}$ considerados ambos términos como promedios para una posición intermedia entre

dos termocuplas adyacentes.

Todas las variables calculadas se relacionaron con la composición, con la estructura final de solidificación, con la zona de contracción final y con la porosidad (macroporosidad) de las probetas, determinándose valores límites obtenidos a partir de las observaciones experimentales.

Finalmente se modelizan los números de Niyama con funciones del tipo Lorentzianas invertidas, obteniéndose un completo conjunto de funciones con parámetros que permiten simular completamente la solidificación tanto en las zonas líquida, pastosa, eutéctica y sólida para cada concentración, lo que permitió la obtención de valores límites para los números de Niyama en dichas aleaciones, por debajo de los cuales se observa evidentemente macroporosidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los principales resultados obtenidos de las velocidades tanto simuladas cuanto experimentales para las interfases $[L/(S+L)]$ en función de la distancia desde el extremo izquierdo (cero considerado en la primer termocupla del extremo izquierdo) se resumen en las Figuras 1a, 1b, 1c y 1d.

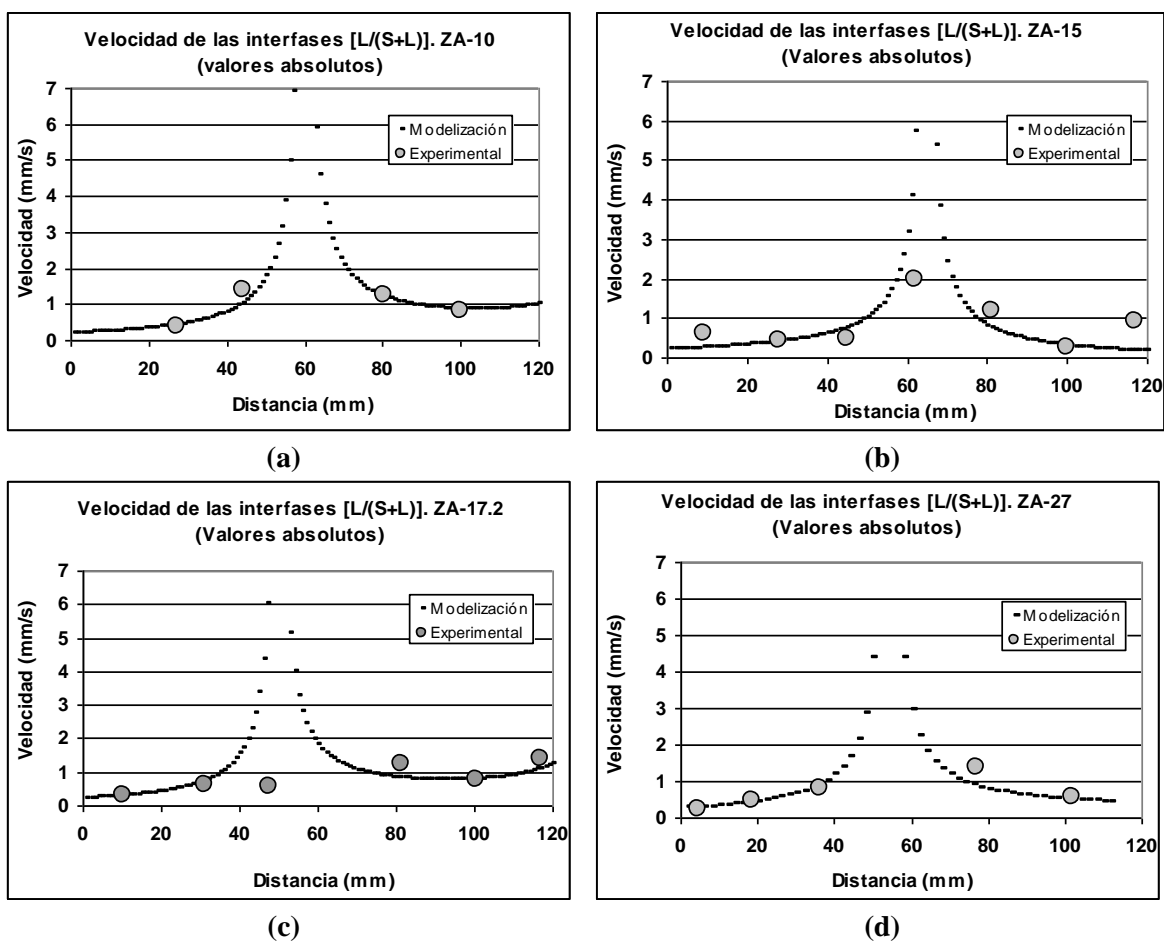


Figura 1. Velocidades de las interfases $[L/(S+L)]$. Valores experimentales y simulados.
a) Aleación ZA-10, b) Aleación ZA-15, c) Aleación ZA-17.2, d) Aleación ZA-27.

Asimismo, para las aleaciones hipereutécticas se determinaron las velocidades de las interfases $[(S+L)/(E+L)]$ y $[(E+L)/S]$ y en el caso de la aleación ZA-27 se determinaron las velocidades de las interfases $[(S+L)/S]$, $[(S+L)/(E+L)]$ y $[(E+L)/S]$. Es de notar que la aleación ZA-27, a las velocidades de enfriamiento impuestas en los experimentos, a medida de que ocurre la transformación sólido-líquido se forma un sólido α rico en aluminio y la concentración de líquido

se incrementa en zinc, quedando un remanente de líquido con la concentración eutéctica que presenta un pequeño plateau al final de la transformación sólido-líquido y que ocurre antes de efectuarse la transformación peritéctica que se produce a una temperatura más baja.

Los principales resultados obtenidos de las velocidades tanto simuladas cuanto experimentales para las interfases [(E+L)/S] en función de la distancia desde el extremo izquierdo (cero considerado en la primer termocupla del extremo izquierdo) se resumen en las Figuras 2a, 2b, 2c y 2d.

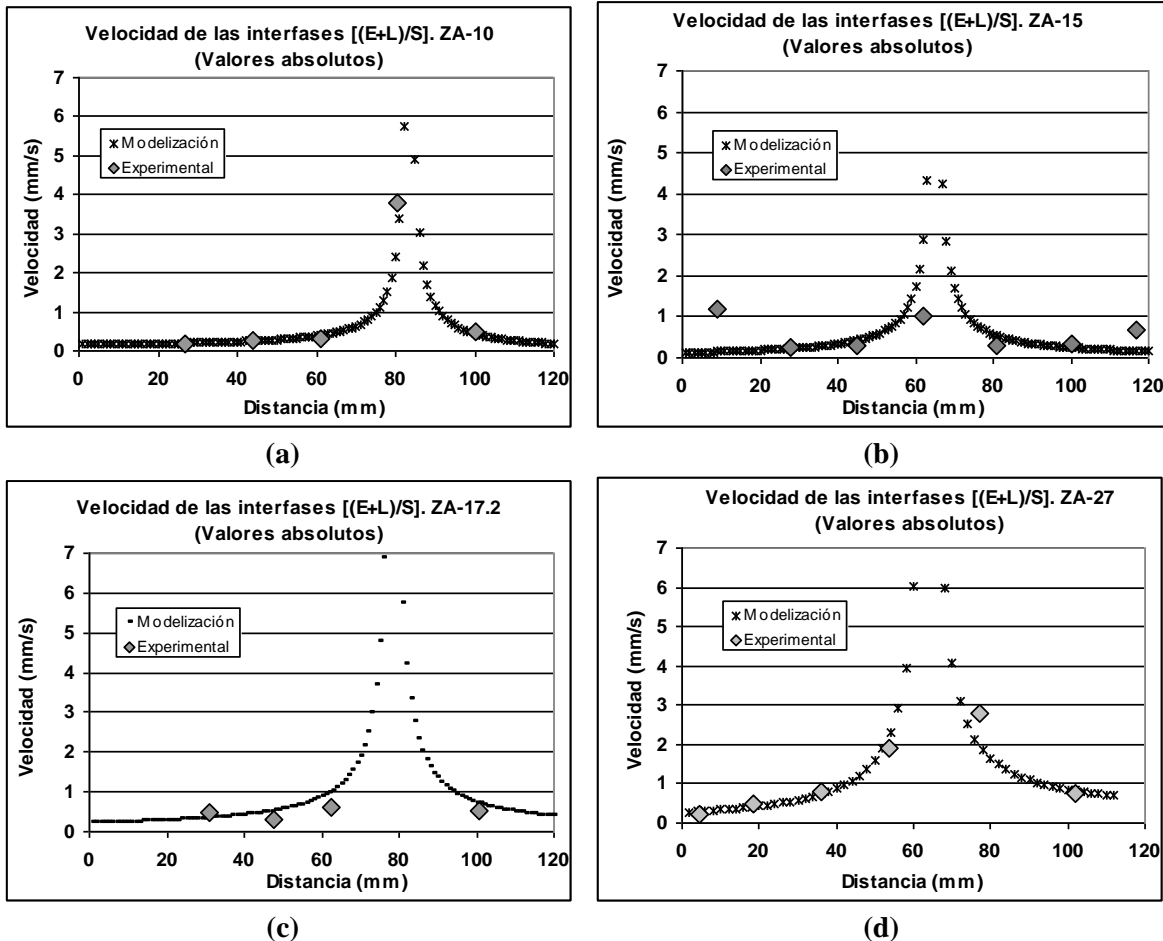


Figura 2. Velocidades de las interfases [(E+L)/S]. Valores experimentales y simulados.
a) Aleación ZA-10, b) Aleación ZA-15, c) Aleación ZA-17.2, d) Aleación ZA-27.

Las aceleraciones de las interfases tampoco son constantes y siguen funciones similares a las de las velocidades, pudiendo éstas ser aproximadas mediante funciones de tipo exponencial.

Para simular las funciones que determinan los números de Niyama en función de la posición medida desde el extremo izquierdo de las probetas de Zn-Al hipereutécticas se utilizaron funciones del tipo Lorentzianas invertidas de dos picos.

Para las aleaciones ZA10, ZA15, ZA17.2 y ZA27, la expresión experimentalmente determinada tiene la forma:

$$\frac{\left| \frac{dT}{dx} \right|}{\sqrt{\left| \frac{dT}{dt} \right|}} = Ny_0 - \frac{K_1}{4 \cdot \sqrt{\omega_1^2 - (x - x_{c1})^2}} - \frac{K_2}{4 \cdot \sqrt{\omega_2^2 - (x - x_{c2})^2}} \quad (1)$$

Que resulta ser válida tanto para las zonas líquida, pastosa, crecimiento eutéctico o zona sólida con la única restricción adicional que el número de Niyama es nulo para todo valor negativo dado por la ecuación (1) y donde K_1 y K_2 dependen del tiempo. Se encontró una relación entre las constantes K_1 y el parámetro ω_1 y entre K_2 y el parámetro ω_2 siendo estas relaciones del tipo cúbica con buenos coeficientes de correlación. Ya que K y ω son dependientes del tiempo, se encontró que $\ln K$ resulta ser una función casi lineal de ω que aparenta ser independiente del estado de la aleación, esto es, pueden ser expresadas como:

$$K_1 = e^{m\omega_1 + b} \quad (2a); \quad K_2 = e^{m\omega_2 + b} \quad (2b)$$

A partir de lo cual, la expresión (1) se puede escribir en la forma:

$$Ny = Ny_0 - \frac{e^{m\omega_1 + b}}{4 \cdot (x - x_{c1})^2 + \omega_1^2} - \frac{e^{m\omega_2 + b}}{4 \cdot (x - x_{c2})^2 + \omega_2^2} \quad (3)$$

Expresión que se torna dependiente únicamente del valor de Ny_0 , de la posición de cada pico x_c y del ancho de la función de Lorentz invertida ω .

En la Figura 3 se muestran los números de Niyama en función del tiempo. Los valores fueron calculados a partir de los datos experimentales de temperatura vs. tiempo y posición, considerando las posiciones intermedias entre termocuplas adyacentes.

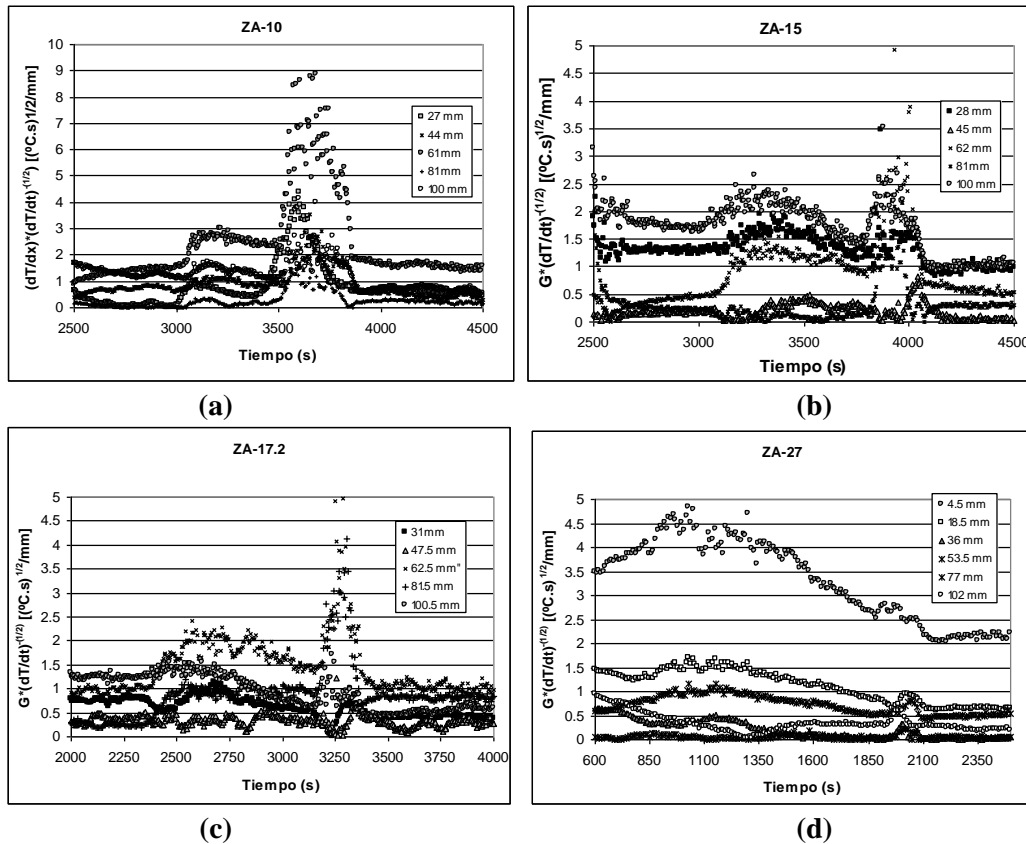


Figura 3. Números de Niyama en función del tiempo. Valores determinados a partir de los datos experimentales. a) Aleación ZA-10, b) Aleación ZA-15, c) Aleación ZA-17.2. d) Aleación ZA-27

En la Figura 4 se presentan los resultados de las simulaciones del número de Niyama en función de la posición en distintos tiempos mediante la función Lorentziana invertida para la aleación ZA-15, para el estado líquido, pastoso (S+L), eutéctico (S+L+E) y sólido. Los coeficientes de correlación entre los valores experimentales y simulados son iguales a la unidad para el estado sólido y para el estado líquido existiendo una muy buena correlación entre las funciones y los datos calculados a partir de los datos experimentales, en tanto que para las simulaciones en el estado pastoso el mínimo coeficiente de correlación determinado es de 0.92769 y en el estado del crecimiento eutéctico el mínimo coeficiente de correlación determinado fue de 0.86946. Los coeficientes de correlación que se presentan en los gráficos son valores promedio.

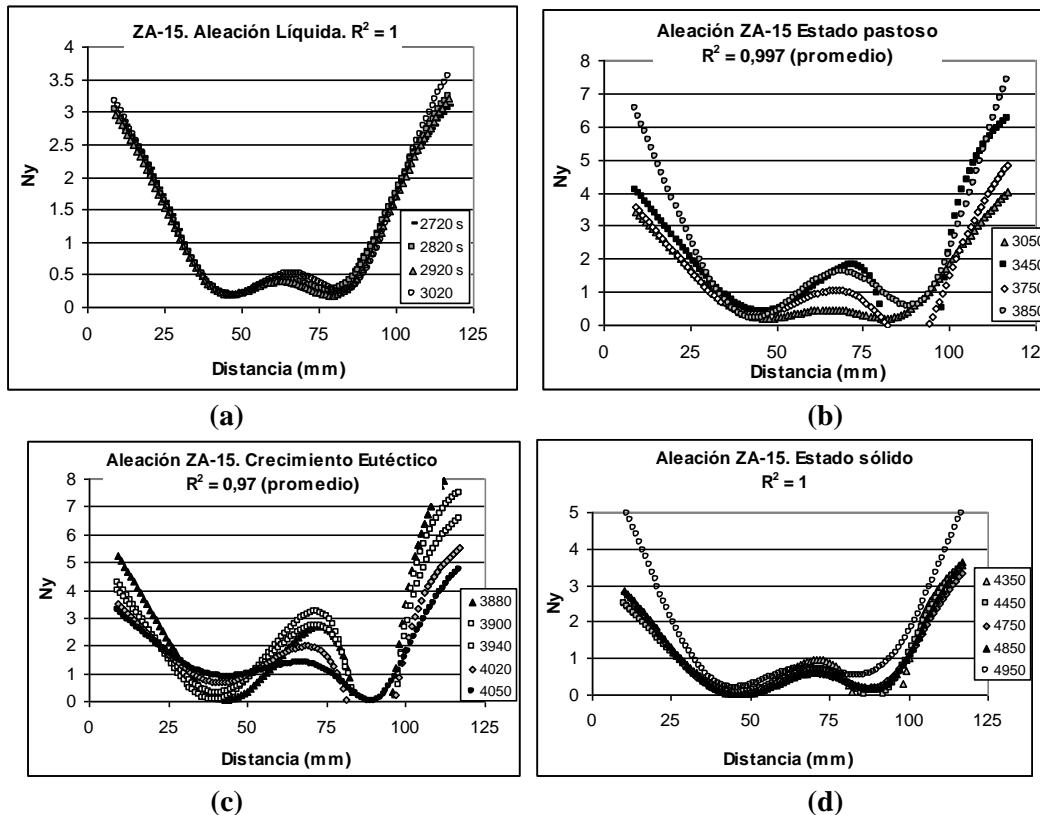


Figura 4. Números de Niyama en función de la posición y el tiempo para cada estado durante la solidificación. Valores modelizados mediante la ecuación (1) para la aleación ZA-15. a) Estado líquido, b) Estado Pastoso, c) Crecimiento eutéctico. d) Estado sólido.

Se calcularon los números de Niyama mínimos para las cuatro aleaciones en función de la distancia desde el extremo izquierdo, considerando seis diferentes criterios para su determinación. El primer criterio fue el de determinar el mínimo en todo el rango desde que la aleación se encuentra en estado líquido hasta el final de la transformación sólido-sólido o el fin del experimento, como se muestra en la figura 6 identificado con líneas de trazos (ó minimum minimorum). El segundo criterio consistió en la determinación de los números de Niyama experimentales mínimos únicamente en el rango de solidificación (desde TL hasta TEf). El tercer criterio consistió en determinar los números de Niyama mínimos únicamente en el rango en el que la aleación se encuentra en la región sólido-líquido, sin considerar las transformaciones eutécticas. El cuarto criterio consistió en determinar los números de Niyama mínimos únicamente en el rango donde ocurre el crecimiento eutéctico. El quinto criterio consistió en determinar los números mínimos para el instante correspondiente al 90% de la transformación en cada volumen considerado (ó 90% del

tiempo de solidificación local TSL entre termocuplas adyacentes). Finalmente, el último criterio se basó en determinar los números de Niyama mínimos en un instante correspondiente al 90 % del tiempo de solidificación total.

El considerar los números mínimos de Niyama a partir de todos los datos experimentales arroja los valores límites mínimos que puede tomar dicho número para la aleación en cuestión en las condiciones de solidificación impuestas al sistema, pero estos valores parecen no estar correlacionados con defectos tales como la porosidad, ya que estos mínimos se producen en la zona líquida, pastosa o al final de la solidificación, allí donde ya concluyó el proceso de transformación. Para las aleaciones hipereutécticas, fue indistinto considerar los números de Niyama mínimos en todo el rango de solidificación ó considerarlos únicamente en la zona sólido-líquido, sin considerar la zona de crecimiento eutéctico, ya que los mínimos se encuentran por lo general en la zona (S+L), con excepción de la aleación ZA-17.2, cuyos mínimos difirieron en las posiciones intermedias de 31 y 47.5 mm. El cuarto criterio arroja valores similares para la aleación ZA-17.2 si se calculan en la zona de crecimiento eutéctico o se calculan en todo el rango de solidificación, ya que los mínimos se producen en la zona (S+L+E). Los criterios del 90% del TSL ó del 90% del TST dan números de Niyama mínimos más elevados en todos los casos conservándose la tendencia de los números mínimos en función de la distancia, como se puede apreciar en los gráficos de la Figura 5.

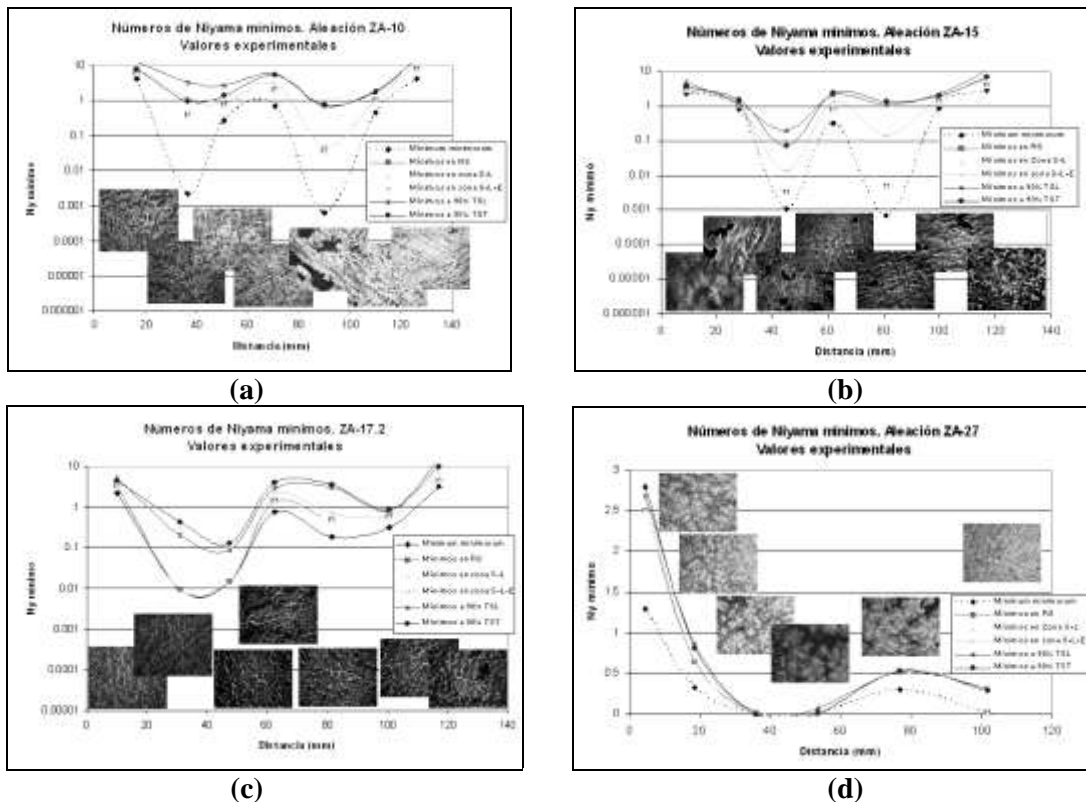


Figura 5. Números de Niyama mínimos en función de la posición evaluados mediante seis criterios diferentes y micrografías selectas en las zonas de su determinación.
a) Aleación ZA-10, b) Aleación ZA-15, c) Aleación ZA-17.2. d) Aleación ZA-27

En la gráfica c) de la Figura 5 correspondiente a la aleación ZA-17,2 se puede observar que no siempre donde se localizan los mínimos números de Niyama determinados experimentalmente se encuentra únicamente la presencia de macroporosidad, existiendo macroporosidad a valores mayores que los mínimos. Parecería existir un umbral a partir del cual la macroporosidad es

evidente y que depende de la concentración de la aleación, pero el valor de dicho umbral depende de cuál es el criterio para la determinación de los números de Niyama mínimos.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se desprenden del presente trabajo de investigación son las siguientes:

1. Las velocidades y las aceleraciones de las interfases no son constantes durante la solidificación unidireccional de aleaciones ZA hipereutécticas cuando se utilizan dos sentidos de extracción calórica predominante.
2. Las posiciones de colisión de las interfases que avanzan en sentido contrario no son coincidentes para las interfases $[L/(S+L)]$, $[(S+L)/(E+L)]$ y $[(E+L)/S]$.

3. Los valores que adoptan los números de Niyama, dados por la relación $Ny_{x,t} = \frac{|dT/dx|}{\sqrt[2]{|dT/dt|}}$,

dependen de las condiciones de solidificación impuestas, de la concentración de aleación y resultan ser dependientes del tiempo y de la posición longitudinal en la probeta. Alcanza valores infinitos allí donde las velocidades de enfriamiento son nulas y es insensible ante el signo del gradiente y de la relación dT/dt , es decir, no discrimina el enfriamiento del calentamiento local producido por ejemplo durante la recalcencia.

4. La forma de las funciones que adoptan los números de Niyama en función del tiempo es compleja y de difícil determinación, resultando ser también dependiente de la posición considerada, con la complicación adicional de que en el rango de solidificación se encuentran valores infinitos que por lo general no se toman en consideración.
5. La forma de las funciones que adoptan los números de Niyama en función de la posición pudo ser aproximada para las aleaciones ZA hipereutécticas mediante funciones del tipo Lorentzianas invertidas de dos picos con buenos coeficientes de correlación, en tanto que para la aleación ZA-27 una función Lorentziana de un pico resultó suficiente ($K_2 = 0$).
6. Se encontró una relación entre las constantes K_1 y el parámetro ω_1 y entre K_2 y el parámetro ω_2 siendo estas relaciones del tipo cúbica con buenos coeficientes de correlación. Ya que K y ω dependen del tiempo de manera similar, se encontró que $\ln K$ resulta ser una función casi lineal de ω con buenos coeficientes de correlación y que aparenta ser independiente del estado de la aleación, lo que simplifica la modelización de las funciones de cálculo de los números de Niyama en función de la posición.

REFERENCIAS

1. N. Jain, K. Carlson and C. Beckermann, "Round robin study to assess variations in casting simulation Niyama criterion predictions"; Proceedings of the 61st Technical and Operating Conference, 2008.
2. K. Carlson and C. Beckermann, "Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless Niyama criterion"; Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 40 (2009), p. 163-175.
3. S.F. Gueijman, C.E. Schvezov, A.E. Ares, "Vertical and horizontal directional solidification of Zn-Al and Zn-Ag diluted alloys"; Materials Transactions, to be published in October 2010.
4. S.F. Gueijman, A.E. Ares, C.E. Schvezov, "Seguimiento de las Interfases en Aleaciones Binarias Zn-1%Al Solidificadas Direccionalmente"; Anales SAM/CONAMET, 2009, p.160-165.