

Rev. Cienc. Tecnol.

Año 7 / Nº 7b / 2005 / 22-29

TRANSICIÓN DE ESTRUCTURA COLUMNAR A EQUIAXIAL EN ALEACIONES Al-Mg Y Al-Zn

^{1,3}Ares, A. E.; ²Caram, R.; ³Schvezov, C. E.

¹Becaria Postdoctoral de Reinserción del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

²Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais. Avenida Zeferino Vaz S/N, C.P. 6122, CEP.13083-970, Campinas, San Pablo, Brasil.

³Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones. Félix de Azara 1552, (3300), Posadas, Misiones, Argentina.

COLUMNAR TO EQUIAXED TRANSITION IN Al-Mg AND Al-Zn ALLOYS

ABSTRACT

The columnar-to-equiaxed transition (CET) was investigated in Al-2wt%Mg, Al-4wt%Mg, Al-2wt%Zn and Al-4wt%Zn alloys directionally solidified from the chill face. The transition occurs when the temperature gradients in the melt ahead of the columnar dendrites are in the range of (-1.54 to 0.31) °C/cm for Al-2wt%Mg, (-1.67 to 0.09) °C/cm for Al-4wt%Mg, (-1.54 to 0.91) °C/cm for Al-2wt%Zn and (-11.38 to -0.22) °C/cm for Al-4wt%Zn. When the CET occurs, the liquids interface velocities were about (0.10 to 0.14) cm/s, (0.11 to 0.18) cm/s, (0.10 to 0.14) cm/s and (0.12 to 0.18) cm/s, respectively. Also, a supercooling of (0.23 to 1.15) °C for Al-Mg and (0.91 to 1.40) °C for Al-Zn were measured, which was associated with the supercooling for the nucleation and growth of the equiaxed grains ahead of the columnar front. The results obtained in both alloys systems are presented and discussed.

KEYWORDS: Directional solidification, Columnar to Equiaxed transition Al-Mg alloys Al-Zn alloys.

RESUMEN

La transición de estructura columnar a equiaxial (TCE) fue investigada en aleaciones Al-2%Mg, Al-4%Mg, Al-2%Zn y Al-4%Zn solidificadas direccionalmente a partir de la zona chill. La transición ocurre cuando el gradiente de temperatura en el líquido, adelante de las dendritas columnares, se encuentra en el rango de (-1.54 a 0.31) °C/cm para Al-2%Mg, (-1.67 a 0.09) °C/cm para Al-4%Mg, (-1.54 a 0.91) °C/cm para Al-2%Zn y (-11.38 a -0.22) °C/cm para Al-4%Zn. Cuando la TCE ocurre, la velocidad de la interfase líquida alcanza valores de (0.10 a 0.14) cm/s, (0.11 a 0.18) cm/s, (0.10 a 0.14) cm/s y (0.12 a 0.18) cm/s, respectivamente. También, fue medido un sobreenfriamiento de (0.23 a 1.15) °C para aleaciones Al - Mg y de (0.91 a 1.40) °C para aleaciones Al - Zn, el mismo está asociado con el sobreenfriamiento necesario para la nucleación y crecimiento de los granos equiaxiales adelante del frente columnar. Los resultados obtenidos en ambos sistemas de aleaciones se presentan y discuten.

PALABRAS CLAVES: Solidificación direccional, Transición Columnar a Equiaxial, Aleaciones Al-Mg, Aleaciones Al-Zn.

INTRODUCCIÓN

Los resultados que se presentan en este trabajo son una continuación de una investigación previa sobre el estudio de la transición de estructura columnar a equiaxial en aleaciones plomo-estaño [1-5] aluminio-cobre y aluminio-silicio-cobre [6-8], que ahora se extienden a otras aleaciones de interés tecnológico, tales como aluminio-magnesio y aluminio-zinc. En las investigaciones previas el efecto de varios parámetros de solidificación sobre la transición fue determinado y analizado. Los parámetros analizados fueron la posición de los frentes de solidificación dados por las temperaturas *solidus* y *liquidus*, la velocidad de enfriamiento y el gradiente de temperatura. Las aleaciones seleccionadas para el presente estudio son Al-2%Mg, Al-4%Mg, Al-2%Zn y Al-4%Zn.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las aleaciones fueron solidificadas direccionalmente en un dispositivo experimental que consiste de una unidad de calentamiento, un sistema de control de temperaturas, un sistema de adquisición de datos, un sistema de movimiento de muestra y un sistema de extracción de calor. El dispositivo se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Previo a la realización de los experimentos se determinaron las temperaturas *solidus* y *liquidus* por análisis térmico diferencial.

Después de la solidificación direccional, las muestras fueron cortadas en la dirección axial, pulidas y atacadas químicamente. Las aleaciones aluminio-zinc se atacaron

con NaOH al 20 % en peso y entonces sumergidas en una solución 1:1 de HNO₃/ H₂O; en el caso de las aleaciones aluminio-magnesio se utilizó 320 ml HCl, 160 ml HNO₃ y 20 ml HF. La posición de la transición se determinó por observación visual y microscopía óptica.

RESULTADOS

Se realizaron un número de 20 experiencias exitosas en las que se obtuvieron la transición de estructura columnar a equiaxial. La transición ocurre entre 0.7 cm y 4.1 cm desde la base de la muestra. Las posiciones de la transición de estructura columnar a equiaxial para cuatro aleaciones diferentes se pueden observar en la Figura 2, para Al-2%Mg, Al-4%Mg, Al-2%Zn y Al-4%Zn. En la Figura 2 se puede apreciar claramente que la transición no ocurre en una línea sino en una región de aproximadamente 1 cm o mayor.

Temperaturas *liquidus* y *solidus*

Las temperaturas *liquidus* y *solidus* de cada aleación fueron determinadas utilizando el sistema de análisis térmico diferencial, NETZSCH STA 449 C, con celda calibrada con elementos puros. Las mediciones de DTA fueron realizadas con una carga de 200 mg de muestras precalentadas en crucibles de alúmina. Las velocidades de calentamiento y enfriamiento utilizadas fueron de 10 °C/min en atmósfera de argón. Los ciclos de calentamiento y enfriamiento se repitieron varias veces para chequear la reproducibilidad de los resultados, las temperaturas *liquidus*, T_L, y *solidus*, T_S, se tomaron de las curvas de calentamiento y enfriamiento en la forma usual [9-10].

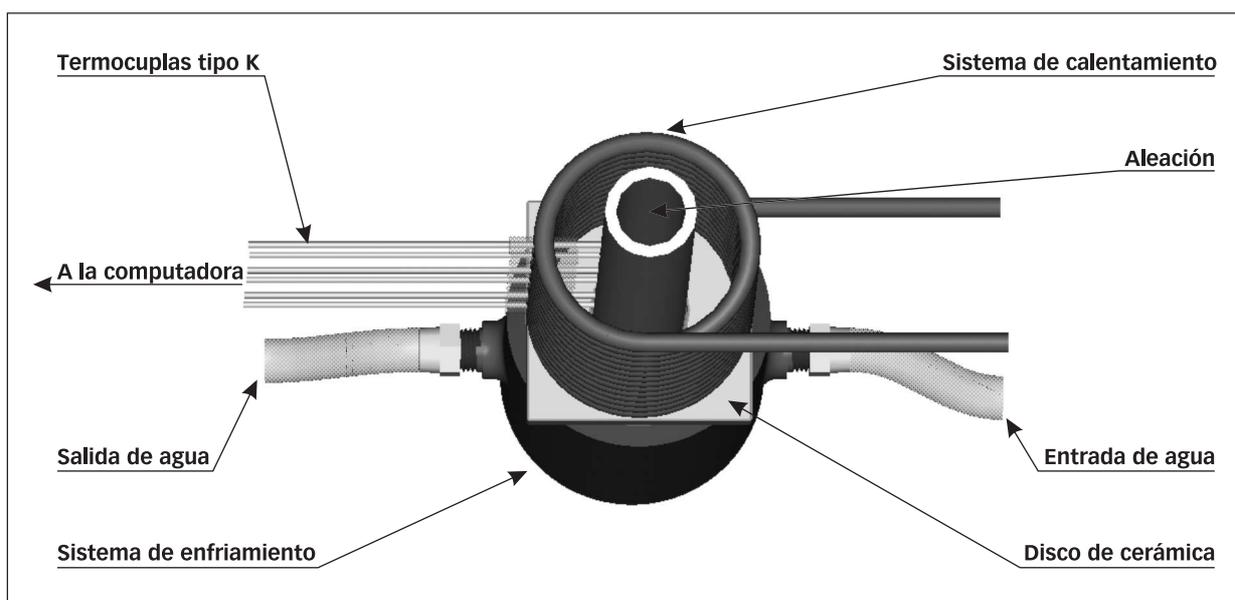


FIGURA 1. Esquema del dispositivo experimental utilizado.

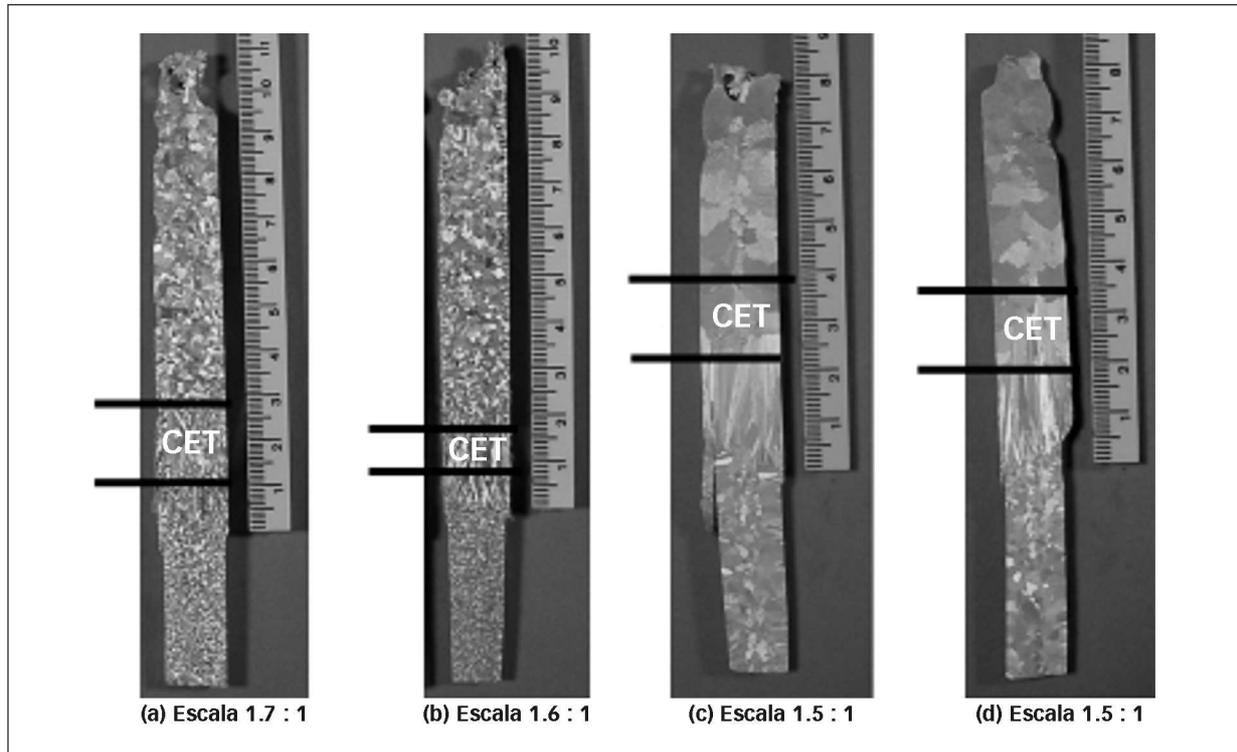


FIGURA 2. Posición de la TCE para cuatro diferentes sistemas de aleaciones. (a) Experiencia N° 1. Al-2%Mg. (b) Experiencia N° 6. Al-4%Mg. (c) Experiencia N° 11. Al-2%Zn. (d) Experiencia N° 16. Al-4%Zn.

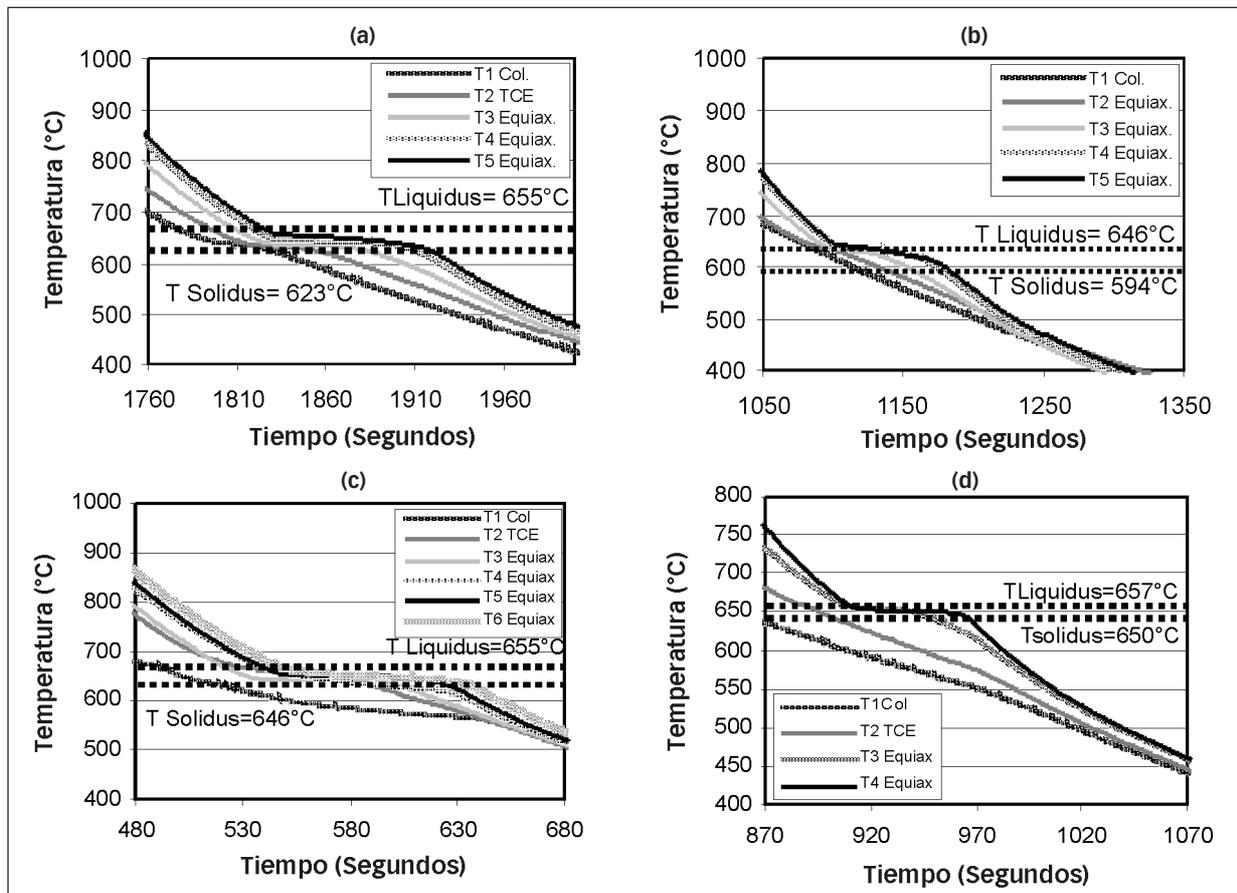


FIGURA 3. Curvas de enfriamiento. (a) Experiencia N° 1. Al-2%Mg. (b) Experiencia N° 6. Al-4%Mg. (c) Experiencia N° 11. Al-2%Zn. (d) Experiencia N° 16. Al-4%Zn.

Los resultados se muestran en la Figura 3 y en la Tabla 1, los mismos están dentro de los valores predichos por el diagrama de fase para las cuatro aleaciones [11].

TABLA 1. Resultados del análisis térmico diferencial para las temperaturas *liquidus*, T_L , y *solidus*, T_S .

Aleación	T_L , <i>Liquidus</i> (°C)	T_S , <i>Solidus</i> (°C)	$T_L - T_S$ (°C)
Al-2%Mg	655	623	32
Al-4%Mg	646	594	52
Al-2%Zn	657	650	7
Al-4%Zn	655	646	9

Velocidad de Enfriamiento

La velocidad de enfriamiento de la aleación líquida fue determinada a partir de las curvas de temperatura *versus* tiempo en las posiciones de cada termocupla y tomando la pendiente promedio. Las curvas de temperatura *versus* tiempo correspondiente a las aleaciones Al-2%Mg, Al-4%Mg, Al-2%Zn y Al-4%Zn se presentan en la Figura 3. Las velocidades de enfriamiento calculadas a partir de este tipo de curvas se listan en la Tabla 2 para todas las experiencias como V.E.LIQ.; velocidades de 1.72 a 2.80 °C/s fueron producidas. La Tabla 2 también lista la posición de la transición desde la base de la mues-

tra, que se encuentra en el rango de $TCE_{MIN.}$ a $TCE_{MAX.}$ (cm). Comparando las velocidades de enfriamiento con las distancias, que corresponden a las longitudes de la zona columnar, para cuatro aleaciones, se observa que el incremento de la velocidad incrementa la longitud de los granos columnares.

Las curvas de temperatura *versus* tiempo muestran que la evolución de la temperatura depende de la estructura que se ha formado. Durante la solidificación columnar la temperatura disminuye en forma estable, en cambio en la región equiaxial, durante la transición, hay una recalcancia que incrementa la temperatura desde un mínimo; el nivel de recalcancia para cada experiencia se lista en la Tabla 2 como REC (°C).

En la Tabla 2 y comparando los resultados de las experiencias N° 1 y N° 7, se puede observar que en ambos casos las velocidades de enfriamiento en el líquido son similares pero la concentración de Mg es diferente y la longitud de la zona columnar disminuye para la aleación con elevada concentración; para las aleaciones con elevada concentración, las concentraciones son diferentes y la longitud de la zona columnar disminuye para la aleación con elevada concentración; sin embargo esta tendencia no está claramente establecida y no fue observada para las aleaciones Al-Zn.

TABLA 2. Velocidad de enfriamiento del líquido ($VE_{LIQ.}$), velocidad de enfriamiento del sólido ($VE_{SOL.}$), velocidad de la interfase líquida crítica ($V_{LC.}$), posición mínima de la TCE ($TCE_{MIN.}$), posición máxima de la TCE ($TCE_{MAX.}$), gradientes críticos (G_c) y valores de recalcancia (REC.) obtenidos de las curvas de temperatura *versus* tiempo.

N°	Aleación	$VE_{LIQ.}$ (°C/s)	$VE_{SOL.}$ (°C/s)	$V_{LC.}$ (cm/s)	$TCE_{MIN.}$ (cm)	$TCE_{MAX.}$ (cm)	G_c (°C/cm)	REC.(°C)
1	Al-2%Mg	2.39	1.054	0.14	1	3.1	0.31	0.69
2	Al-2%Mg	1.93	1.26	0.12	0.95	2.9	-0.52	0.86
3	Al-2%Mg	1.87	1.12	0.10	0.85	2.8	-0.63	0.71
4	Al-2%Mg	1.72	1.09	0.13	0.8	2.7	0.91	0.63
5	Al-2%Mg	2.46	1.39	0.11	1.2	3.5	-1.54	0.98
6	Al-4%Mg	2.80	1.59	0.14	0.7	1.7	-0.36	1.15
7	Al-4%Mg	2.34	1.25	0.11	0.9	1.95	0.09	0.42
8	Al-4%Mg	2.25	1.13	0.12	0.9	1.9	-0.52	0.56
9	Al-4%Mg	1.96	1.63	0.16	0.8	1.8	-0.22	0.23
10	Al-4%Mg	2.55	1.52	0.18	1.4	2.8	-1.67	0.35
11	Al-2%Zn	2.69	1.45	0.14	2.2	3.9	-1.22	0.99
12	Al-2%Zn	1.93	1.26	0.12	1.3	2.9	-0.52	1.06
13	Al-2%Zn	1.87	1.12	0.10	1.2	2.8	-0.63	0.91
14	Al-2%Zn	1.72	1.09	0.10	1.0	2.7	0.91	0.93
15	Al-2%Zn	2.46	1.39	0.11	1.8	3.5	-1.54	0.98
16	Al-4%Zn	2.64	1.25	0.18	1.9	3.4	-11.38	1.40
17	Al-4%Zn	2.80	1.59	0.12	3.05	4.1	-5.09	1.32
18	Al-4%Zn	2.25	1.13	0.12	1.5	2.2	-1.52	0.95
19	Al-4%Zn	1.96	1.63	0.16	1.2	2.8	-0.22	1.23
20	Al-4%Zn	1.78	1.52	0.16	1	2.45	-1.67	1.35

Recalescencia

En las curvas que muestran la evolución de la temperatura con el tiempo para cada termocupla y en cada experiencia, fue posible identificar tres etapas; velocidad de enfriamiento del líquido hasta el punto de fusión, solidificación del líquido y enfriamiento del sólido hasta temperatura ambiente. En algunos casos fue posible identificar un corto periodo de recalescencia, que ocurre en las proximidades de una termocupla, o en la región de la transición. Un caso típico se muestra en la Figura 4 para la experiencia N° 1, donde el valor de la recalescencia encontrado fue de $0.69\text{ }^{\circ}\text{C}$. La recalescencia es el resultado del calor latente liberado por los granos equiaxiales que nuclean adelante de la interfase líquida. Estos núcleos comienzan a crecer en la región adyacente a la interfase líquida y el calor latente alcanzado sobrecalienta el líquido que rodea. Resulta adecuado suponer que como resultado de esto, algunos pequeños granos y núcleos pueden refundirse produciendo dos efectos; frenando momentáneamente la interfase líquida e interrumpiendo o disminuyendo el flujo de calor desde el seno del líquido, pero sin refundir algunos granos adelante y más lejos de la zona recalescida.

Una vez que el calor latente se difunde en ambas direcciones, dentro del líquido y en la zona pastosa, el flujo de calor desde el seno del líquido y hacia el sólido se vuelve a establecer, sin embargo en la zona recalescida existe una disminución de granos y núcleos. Como resultado los granos equiaxiales adelante y lejos de la interfase crecen con un mayor tamaño que los otros granos, que nuclearon y crecieron en la zona recalescida, compitiendo con el crecimiento lento de las dendritas de los granos columnares. Las estructuras resultantes en las cuatro experiencias se muestran en la Figura 2, en aleaciones Al-Mg y Al-Zn.

El incremento de temperatura asociado con la recalescencia medida en las veinte experiencias se lista en la Tabla 2; se puede observar que los rangos de recalescencia se encuentran entre $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un valor promedio de $0.83\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, si el grado de recalescencia se discrimina por tipo de aleación, se obtiene que los valores promedio son de $0.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ para aleaciones Al-Mg y $1.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ para aleaciones Al-Zn. Cuando el grado de recalescencia se analiza para cada tipo de aleación como una función de la concentración los resultados son como sigue: para Al-2%Mg el valor promedio de recalescencia es de $0.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ y para Al-4% Mg es $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}$; de otra manera, para las aleaciones Al-2%Zn es 0.97 y para Al-4%Zn es $1.25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos resultados muestran dos comportamientos muy diferentes asociados con el elemento aleante. Por otro lado, las aleaciones que contienen Mg

tienen un valor más bajo de recalescencia que las aleaciones que contienen Zn. Además, el grado de recalescencia disminuye con el incremento de la concentración para aleaciones conteniendo Mg, mientras que para aleaciones que contienen Zn el comportamiento es opuesto. Estos resultados se pueden asociar con la nucleación y crecimiento de los granos equiaxiales, que finalmente resulta en dos diferentes estructuras, que se discuten en otra publicación [12].

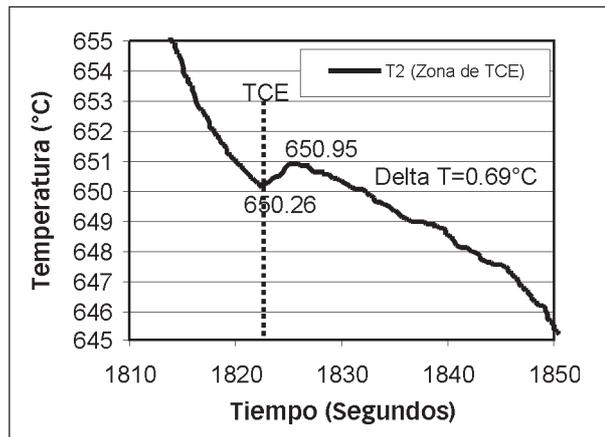


FIGURA 4. Curva de temperatura versus tiempo. Recalescencia. Experiencia N°1. Al-2%Mg

Posición de las interfaces de solidificación y cálculo de las velocidades de solidificación

La posición de los frentes *liquidus* y *solidus* fue detectada en las posiciones de cada termocupla por el inicio y el fin de la solidificación. Ambas temperaturas fueron determinadas por el cambio de pendiente de las curvas de enfriamiento que ocurre en cada evento.

Las velocidades de los frentes de solidificación se calcularon dividiendo la distancia de separación entre termocuplas consecutivas y el tiempo que toma a cada frente pasar por las posiciones de ambas termocuplas. Estos valores se definen como las velocidades de los frentes *liquidus*, V_L , y *solidus*, V_S . La velocidad del frente *liquidus* en el momento de la transición se denomina velocidad *liquidus* crítica, V_{LC} . Los valores de la velocidad *liquidus* crítica para cada experiencia se listan en la Tabla 2. Se puede apreciar que en las veinte experiencias se obtuvo la transición de estructura columnar a equiaxial.

Un resultado típico que muestra la posición de los frentes *liquidus* y *solidus* se aprecia en la Figura 5 para Al-2% Mg. En la parte (a) cada barra horizontal representa el periodo de solidificación desde el inicio (*liquidus*) hasta el final (*solidus*) en la posición de cada termocupla. En la parte (b) las líneas representan la posición de los frentes *liquidus* y *solidus* con el tiempo. Se

aprecia además que, el frente *liquidus* comienza a moverse muy rápido después del comienzo de la transición de estructura columnar a equiaxial. Cada línea se puede ajustar por una expresión en función del tiempo. Las derivadas de estas funciones están dadas por las velocidades de los respectivos frentes, también como una función

del tiempo. Las velocidades también pueden colocarse como una función de la posición utilizando la relación entre posiciones *versus* tiempo. Las posiciones para las mismas cuatro aleaciones se grafican y representan en la Figura 6. En la figura se observa que en los cuatro casos, la velocidad *liquidus* es siempre mayor que la velocidad

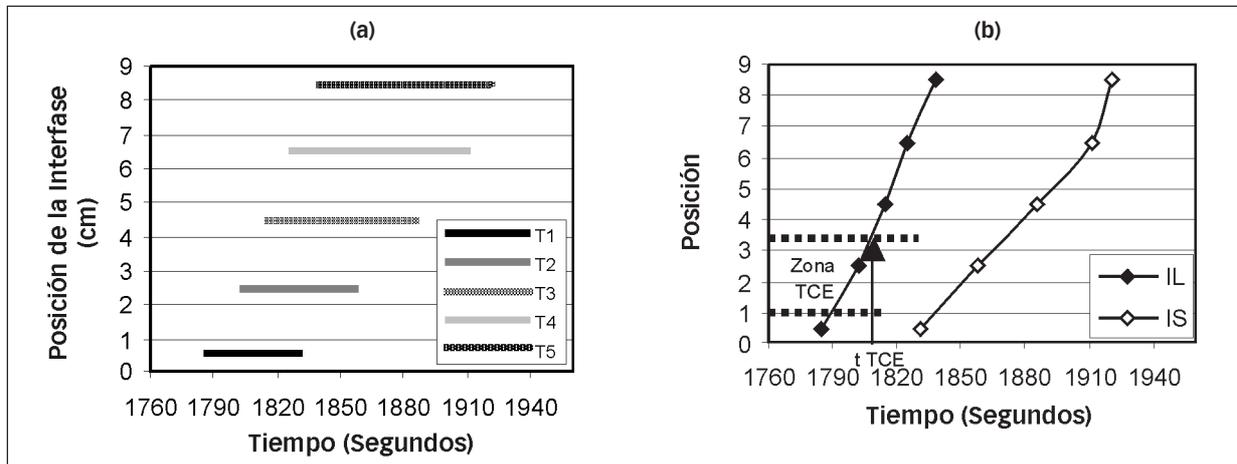


FIGURA 5. Posiciones de las interfases líquida (l_l) y sólida (l_s). (a) Período de tiempo que dura la solidificación en la posición de cada termocupa. (b) Interfases *liquidus* y *solidus*. Al-2%Mg.

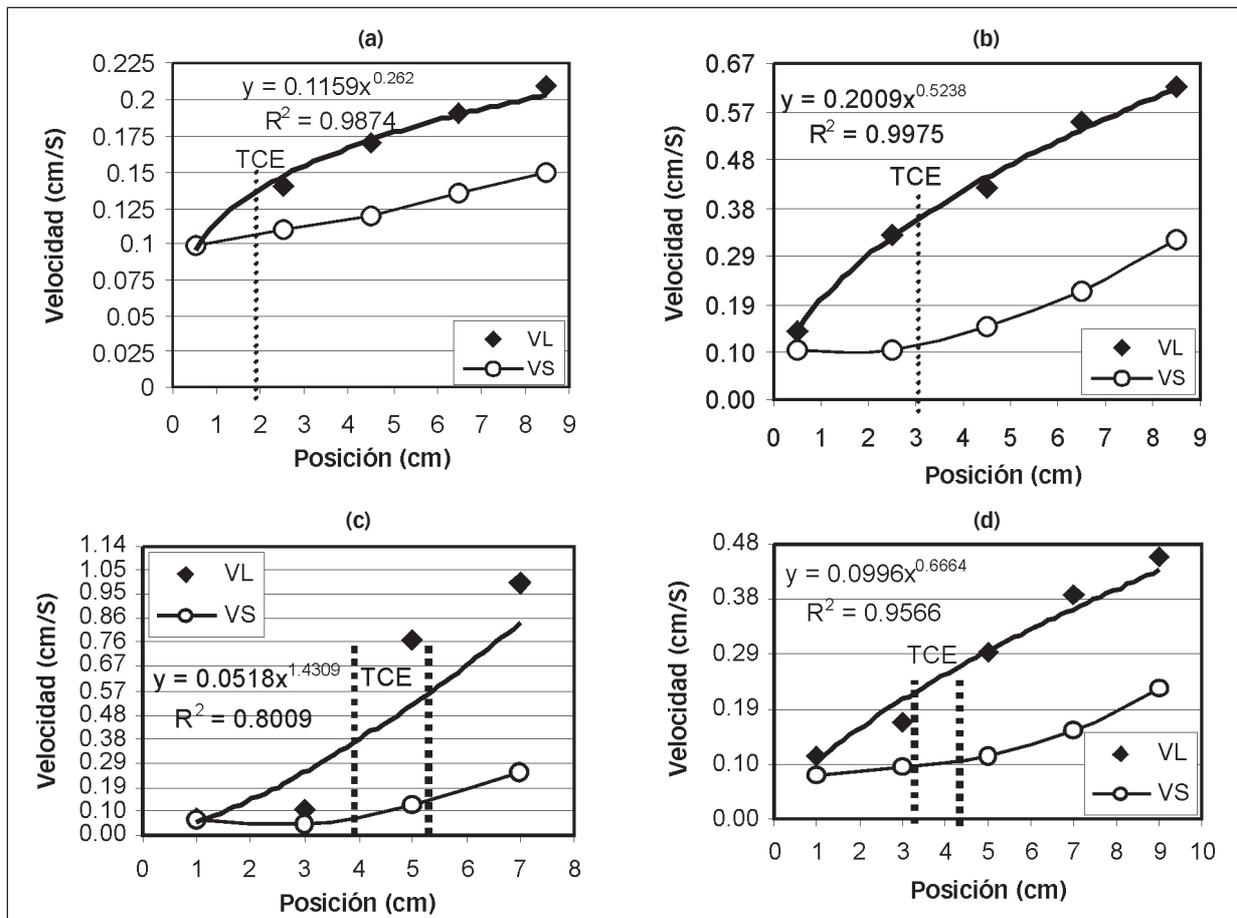


FIGURA 6. Funciones que representan la velocidad de la interfase líquida. (a) Experiencia N°1. Al-2%Mg. (b) Experiencia N°6. Al-4%Mg. (c) Experiencia N° 11. Al-2%Zn. (e) Experiencia N° 16. Al-4%Zn.

solidus. Como resultado de esto, el tamaño o la longitud de la región pastosa se vuelve mayor. También, se puede apreciar que en ningún caso existió enfriamiento desde la parte superior, que podría resultar en una velocidad negativa en los mismos puntos en la parte superior de la probeta. Esto indica que la nucleación de los granos equiaxiales se realiza en un modo de cascada. Similares comportamientos se han reportado en otros sistemas de aleaciones [1-8]. Los valores numéricos de velocidad *liquidus* crítica que se listan en la Tabla 2 son próximos a los mayores valores obtenidos en cada experiencia; indicando la aceleración de la interfase líquida en el instante de la transición.

Es interesante notar que se obtuvieron observaciones similares en aleaciones Pb-Sn donde las velocidades, sin embargo, fueron mucho más bajas, del orden de 0.01 cm/s [1-5] que las medidas en estas experiencias.

Gradientes de temperatura

Los gradientes de temperatura, G , fueron calculados para cada par de termocuplas vecinas como la diferencia de las lecturas entre termocuplas dividida por la distan-

cia de separación entre termocuplas. De acuerdo con esto, el error en los gradientes calculados es

$$\Delta G = G \cdot \left(\left(\frac{0.5+0.5}{T_{i-1}-T_i} \right) + \frac{0.1}{2} \right) = \frac{G}{T_{i-1}-T_i} + 0.05 \cdot G \quad (1)$$

Los valores de los gradientes se graficaron en la Figura 7 (a a d)) para cuatro experiencias, y para cada sistema de aleación. En todas las figuras se observa que desde el inicio de la solidificación, los gradientes disminuyen con el tiempo. El valor mínimo siempre corresponde a la posición de la transición de estructura columnar a equiaxial.

Los gradientes que se indican en la Figura 7 (b), (c) y (d) corresponden a las experiencias 6, 11 y 16, alcanzando valores negativos de $-0.36 \text{ }^\circ\text{C/cm}$, $-1.22 \text{ }^\circ\text{C/cm}$ y $-11.38 \text{ }^\circ\text{C/cm}$, respectivamente. Como se muestra en la Tabla 2, los gradientes determinados son en su mayoría negativos. Este valor negativo es una indicación de una inversión en los perfiles de temperatura adelante de la interfase, que puede asociarse a la recalcencia debida

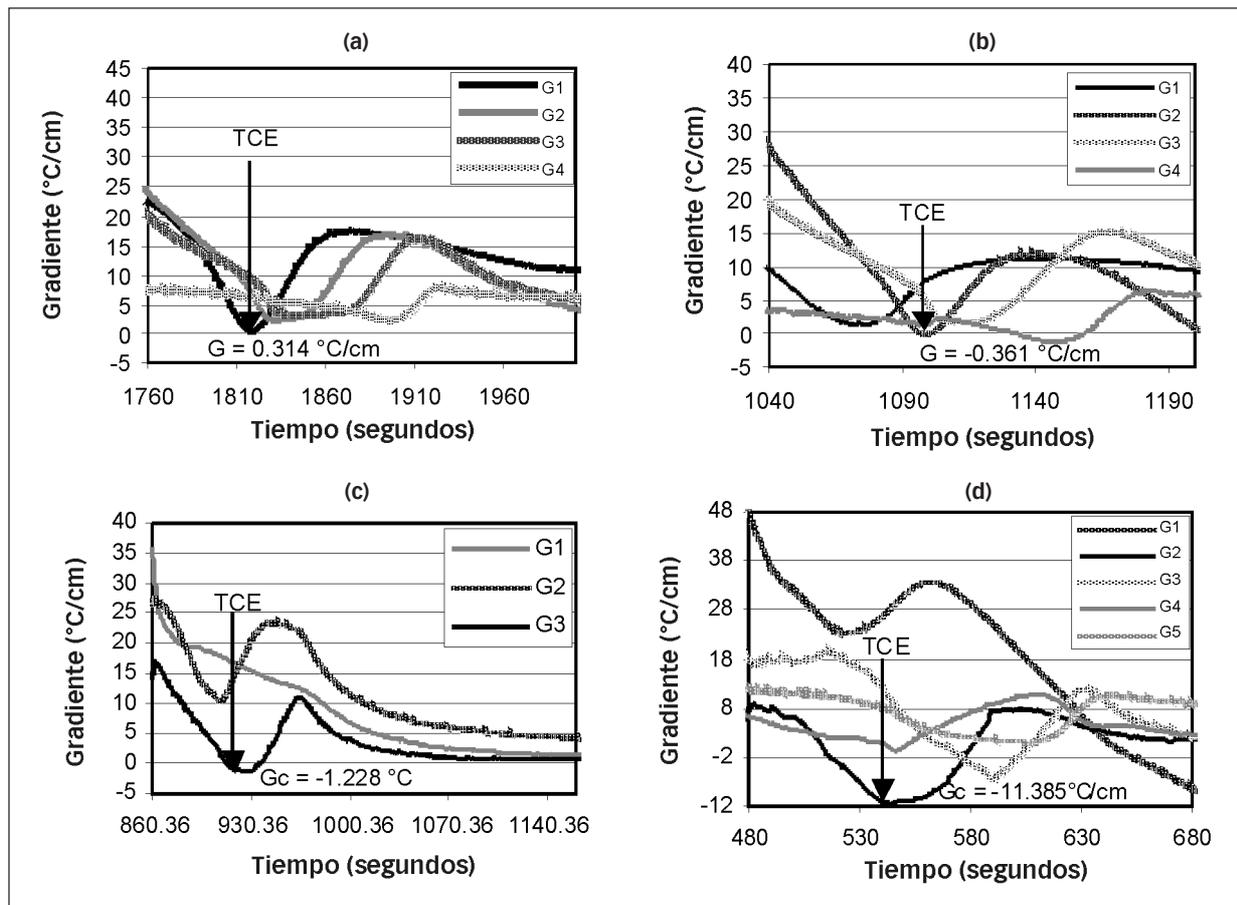


FIGURA 7. Gradientes versus tiempo. (a) Experiencia N°1. Al-2%Mg. (b) Experiencia N°6. Al-4%Mg. (c) Experiencia N° 11. Al-2%Zn. (e) Experiencia N° 16. Al-4%Zn.

a la nucleación masiva de los granos equiaxiales, que fuera previamente reportada y discutida para aleaciones Pb-Sn [1-5]. El hecho de que en algunos casos la posición de las termocuplas no esté localizada en la posición precisa donde ocurre la TCE, puede impedir la detección de gradientes negativos, que creemos que ocurre en todos los casos. De cualquier manera, los valores alcanzan un mínimo en esta posición, que en caso de la Figura 7 (a) es de 0.314 °C/cm. Valores de 10 a 50 °C/cm se observaron al comienzo de la solidificación.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del presente trabajo se pueden resumir como sigue:

1) Se realizó la solidificación direccional de aleaciones base aluminio y se midió la temperatura en las fases sólida y líquida durante todo el proceso.

2) Para los cuatro tipos de aleaciones estudiadas, i.e. Al-2%Mg, Al-4%Mg, Al-2%Zn y Al-4%Zn; se obtuvo la transición de estructura columnar a equiaxial y los valores de gradientes calculados alcanzaron un mínimo durante la transición; y en la mayoría de los casos valores negativos. Los valores están en el rango de (-1.54 a 0.31) °C/cm para Al-2%Mg, (-1.67 a 0.09) °C/cm para Al-4%Mg, (-1.54 a 0.91) °C/cm para Al-2%Zn y (-11.38 a -0.22) °C/cm para Al-4%Zn.

3) En las aleaciones aluminio-magnesio y aluminio-zinc se encontró que un incremento en la velocidad de enfriamiento, incrementa la longitud de la zona columnar.

4) En la transición, las velocidades de las interfases son elevadas, alcanzando valores entre 0.10 y 0.18 cm/s para aleaciones aluminio-magnesio y aluminio-zinc, dependiendo de la experiencia.

5) Fue detectada y medida una recalcancia durante la transición de estructura columnar a equiaxial, siendo del orden de (0.23 a 1.15) °C para Al-Mg y (0.91 a 1.40) °C para Al-Zn.

6) La transición de estructura columnar a equiaxial no es abrupta, sino que ocurre en una zona de 1 cm o mayor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por la ayuda financiera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ares, A. E.; Schvezov, C. E.**
Solidification Parameters during the Columnar-to-Equiaxed Transition in Lead-Tin Alloys, *Metall. Trans. A*, 31: p. 1611-1625. 2000.
- Ares, A. E.**
Ms.Sc. Thesis. UNSAM-CNEA. Buenos Aires. Argentina. 1997.
- Ares, A. E.; Schvezov, C. E.**
Transición Columnar a Equiaxial en Aleaciones Plomo Estaño. *Primeros Avances; Anales AFA*, 8: p. 247-253. 1996.
- Ares, A. E. ; Schvezov, C. E.**
Transición Columnar a Equiaxial en Aleaciones Plomo-Estaño, *Anales SAM '98*, p. 53-56. 1998.
- Ares, A. E.**
Ph D. Thesis. UNSAM-CNEA. Buenos Aires. Argentina. 2000.
- Ares, A. E.; Ríos, C. T.; Caram, R.; Schvezov, C. E.**
Columnar to Equiaxed Transition in Al-2%Cu, Al-4%Cu and Al-10%Si-2.5%Cu Alloys in Light Metals 2002. Seattle, Washington, USA. 2002.
- Ares, A. E.; Ríos, C. T.; Caram, R.; Schvezov, C. E.**
Análisis Macroscópico y Microscópico de la Solidificación Direccional de Aleaciones Al-10%Si-2.5%Cu. *Anales AFA*, 13, in press, 2002.
- Ares, A. E.; Ríos, C. T.; Caram, R.; Schvezov, C. E.**
Primeros Estudios de la Transición de Estructura Columnar a Equiaxial en Aleaciones Aluminio-Silicio-Cobre y Aluminio-Cobre, *Revista de Ciencia y Tecnología*, 4b: p. 39-46. 2002.
- Speyer, R. F.**
Thermal Analysis of Materials, Marcel Dekker Editor, New York, p. 30-109. 1994.
- Zhu, Y. T.; Devletian, J. H.**
Application of Differential Thermal Analysis to Solid-Solid Transitions in Phase Diagram; *Journal of Phase Equilibria*, 15: p. 37-41. 1994.
- Moffatt, W. J.**
Handbook of Binary Phase Diagrams, Published by General Electric Company Corporate Research and Development Thechnology Marketin Operation, New York, p. 259, 419, 437, 391. 1984.

Recibido: 26/03/04.

Aprobado: 18/05/05.