

Rev. Cienc. Technol.
Año 10 / N° 10b / 2008 / 20-27

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS TÉRMICOS Y ESTRUCTURALES EN ALEACIONES AL-ZN Y ZN-AL SOLIDIFICADAS DIRECCIONALMENTE

Alicia E. Ares, Sergio F. Gueijman, Carlos E. Schvezov

STUDY OF THERMAL AND STRUCTURAL PARAMETERS IN DIRECTIONALLY SOLIDIFIED AL-ZN AND ZN-AL ALLOYS

ABSTRACT

Components manufactured from cast aluminum alloys offer the advantages of lower cost and higher strength-to-weight ratios compared to ferrous alloys and Zn-Al (ZA) alloys combine high strength and hardness, good machinability with good bearing properties. The most common structure in solidification of metallic alloys is the dendrite, which can be either columnar, equiaxed or transitional from columnar to equiaxed (CET microstructure).

In the present research, we investigated correlations between thermal parameters, grain size, dendritic spacing and microhardness in directional solidified samples of Al-Zn and Zn-Al alloys which present different types of structures: columnar, equiaxed and the CET. We analyzed the correlation between cooling rate and dendritic spacing in columnar and equiaxed grains. Also correlations between grain size and dendritic arm spacing and the variations in microhardness were investigated as a function of both microstructure and load applied in the directionally solidified alloys. We concluded: a) the width of the columnar grains decreases with the cooling rate, b) the columnar length can be estimated within the transition region from the position of the fronts and a parameter C which was determined for each alloy, c) the density of equiaxed grains is linearly related to the temperature gradient, d) the secondary arm spacing increases with an increase of the local solidification time, e) the microhardness values decrease when the load increase and reach almost constant values at higher loads and f) bulk alloys have similar microhardness values to those in the equiaxed zone of the directionally solidified samples.

KEY WORDS: Al-Zn and Zn-Al alloys, thermal parameters, structural parameters, directional solidification.

RESUMEN

Los componentes manufacturados de aleaciones de base aluminio ofrecen la ventaja del bajo costo y de una elevada relación esfuerzo/peso comparadas con las aleaciones ferrosas y las aleaciones Zn-Al (ZA) combinan elevado esfuerzo y dureza, buena maquinabilidad con buenas propiedades superficiales.

La estructura más común en la solidificación de aleaciones metálicas es la dendrítica, que puede ser columnar o equiaxial siendo también posible la presencia de la estructura de transición columnar a equiaxial, TCE.

En el presente trabajo se investigan las correlaciones entre los parámetros térmicos, tamaño de grano, espaciado dendrítico y microdureza en muestras solidificadas direccionalmente de aleaciones Al-Zn y Zn-Al y que presentan diferentes tipos de estructuras: columnar, equiaxial y con TCE. Se analiza la correlación entre la velocidad de enfriamiento y el espaciado dendrítico en granos columnares y equiaxiales. También, las correlaciones entre el tamaño de grano, el espaciado dendrítico y las variaciones de microdureza, como una función tanto de la microestructura como de la carga aplicada en aleaciones solidificadas direccionalmente. Se determinó que: a) el ancho de los granos columnares disminuye con la velocidad de enfriamiento, b) la longitud de los granos columnares puede ser estimada en la región de la transición a partir de la posición de los frentes y del parámetro C que puede ser determinado para cada aleación, c) la densidad de los granos equiaxiales se relaciona linealmente con el gradiente de temperatura, d) el espaciado dendrítico secundario se incrementa con el incremento del tiempo de solidificación local, e) los valores de microdureza disminuyen con el incremento de la carga y alcanzan valores constantes a cargas elevadas y f) los valores de microdureza de las aleaciones "as cast" son similares a los valores obtenidos en las zonas equiaxiales de las probetas solidificadas direccionalmente.

PALABRAS CLAVE: Aleaciones Al-Zn y Zn-Al, Parámetros térmicos, Parámetros estructurales, Solidificación direccional.

INTRODUCCIÓN

La solidificación describe el fenómeno de un líquido transformándose en un sólido como resultado de la disminución de temperatura, esto ocurre en varios procesos

industriales [1]. Existen en la literatura un gran número de investigaciones dedicadas al estudio de los procesos de fundición y al diseño de medidas efectivas del control de los sistemas de solidificación y de las estructuras a fin de obtener productos de solidificación de una calidad elevada [2].

En el presente trabajo se estudia la solidificación direccional de aleaciones base aluminio y base zinc, de diferentes composiciones (Al–2%Zn, Al–4%Zn, Al–16%Zn, Zn–2%Al, Zn–4%Al y Zn–16%Al) y, más particularmente, el crecimiento columnar, equiaxial y con transición de estructura columnar a equiaxial (TCE). Evidencias experimentales de la transición de estructura columnar a equiaxial han sido reportadas en trabajos previos [2–4] y también han sido propuestos un gran número de mecanismos a fin de explicar el fenómeno de la TCE [5–6].

Se investigan las correlaciones entre los parámetros térmicos, los tamaños de granos, los espaciamientos dendríticos y la microdureza en muestras solidificadas direccionalmente de aleaciones Al–Zn y Zn–Al, que presentan diferentes tipos de estructuras. Se analiza la correlación entre la velocidad de enfriamiento y el espaciamiento dendrítico tanto en los granos columnares como equiaxiales. También, correlaciones entre el tamaño de grano y el espaciamiento dendrítico y, por último, las variaciones entre microdureza y carga aplicada en aleaciones solidificadas direccionalmente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de aleación de 16 mm de diámetro fueron solidificadas direccionalmente en un dispositivo experimental que consta de una unidad de calentamiento, un sistema de control de temperaturas, un sistema de adquisición de datos, un sistema de movimiento de las muestras y un sistema de extracción calórica [3–6].

Las temperaturas en los diferentes puntos de las muestras fueron medidas utilizando termocuplas tipo K, las cuales fueron previamente calibradas. Las termocuplas fueron localizadas dentro de las muestras a distancias conocidas a partir de la base. Después de la solidificación, se cortaron las muestras en la dirección longitudinal, se pulieron y atacaron químicamente a fin de revelar la macroestructura. Para las aleaciones de aluminio–zinc se utilizó una solución de NaOH al 20% y luego se sumergieron las muestras en solución 1:1 de HNO₃/H₂O y las aleaciones de zinc–aluminio fueron atacadas utilizando ácido clorhídrico concentrado durante tres segundos a temperatura ambiente, seguida de la remoción y limpieza de los depósitos negros resultantes y para revelar la microestructura se utilizó una mezcla conteniendo ácido crómico (50g Cr₂O₃; 4 g Na₂SO₄ en 100 ml de agua) durante 10 segundos a temperatura ambiente [7]. La posición de la transición de estructura en las muestras fue determinada por observación visual y mediante el microscopio óptico.

El tamaño de grano equiaxial fue medido siguiendo la norma estándar ASTM E112 [8], utilizando intervalos iguales equiespaciados en las probetas. Similarmente, la región columnar fue dividida en intervalos y se midió directamente el ancho y la longitud de los granos

columnares.

Las mediciones de espaciamientos dendríticos fueron realizadas utilizando la técnica de intercepción lineal, preferencialmente en las regiones próximas a las posiciones de las termocuplas a fin de poder realizar correlaciones con los parámetros de solidificación.

Las medidas de microdureza fueron realizadas a temperatura ambiente utilizando un microdurómetro Buehler®. Se utilizaron cargas entre 10 g_f y 1000 g_f. Las mediciones fueron realizadas siguiendo la norma ASTM E 384–89[9] utilizando un tiempo de impresión de 15 segundos. A fin de determinar la microdureza promedio se realizaron un mínimo de 10 mediciones en cada posición. La microdureza Vickers (HV) fue determinada siguiendo la siguiente relación:

$$HV = \frac{1.854,4Q}{a^2} \text{ (kg}_f\text{/mm}^2\text{)} \quad (1)$$

donde, Q es la carga aplicada en gramos y a es la longitud de la diagonal en μm .

RESULTADOS

Se realizaron 18 experiencias en las que se obtuvo la transición de estructura columnar a equiaxial, TCE. Las posiciones de las transiciones se presentaron en las probetas entre 0.8 cm y 10.6 cm desde la base de las mismas.

Tamaño de Grano

A fin de determinar el tamaño de los granos equiaxiales se utilizó un histograma típico de frecuencias del tamaño de grano equiaxial para cada uno de los intervalos en que fue dividida la probeta. A partir de este tipo de histogramas se determinó el tamaño de grano equiaxial [5]. Los resultados se presentan en la Figura 1, los cuales incluyen el ancho del grano columnar, y se dibujan como una función de la posición en las muestras solidificadas, para dos probetas de concentraciones diferentes. En la Figura 1 (a), el tamaño de los granos equiaxiales varía entre 3,0 y 3,5 mm en la región de transición y luego comienza a incrementarse hasta un valor de 5,0 mm al final de la muestra de Al–16%Zn, que también es la última parte en solidificar. En el caso del ancho de los granos columnares se observa que el tamaño se encuentra entre 2,5 y 3,5 mm en la región de transición. En el caso de la Figura 1 (b), que corresponde a una aleación de Zn–16%Al, el tamaño de grano equiaxial es alrededor de 0,5 mm en la región de la transición y se incrementa a 1,0 mm en la zona equiaxial superior. El ancho de los granos columnares se mantiene aproximadamente constante, en un valor de 1 mm en la zona de TCE.

Un análisis similar fue realizado en las 18 probetas obtenidas. Los puntos de las zonas equiaxiales de las figuras fueron ajustados mediante una función polinómica de tercer grado.

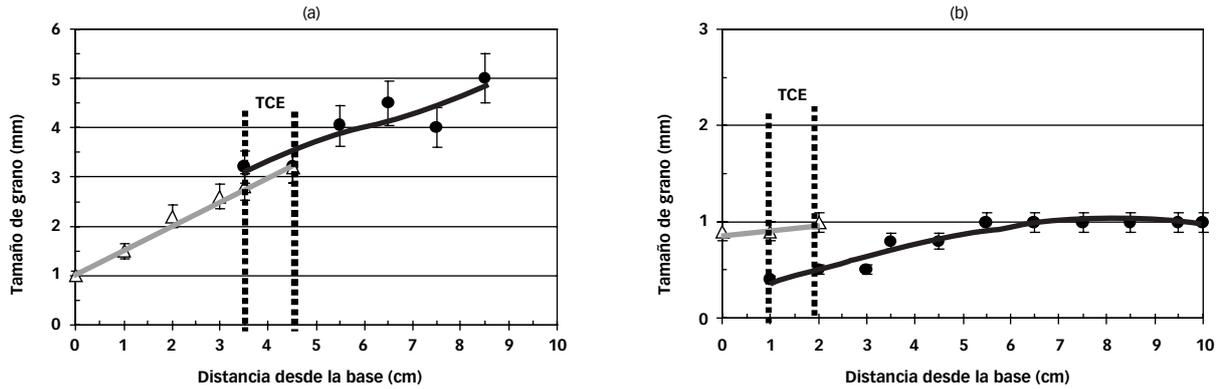


FIGURA 1. Tamaño de grano versus distancia desde la base de la muestra. (a) Al-16%Zn. (b) Zn-16%Al. Referencias: a) ● equiaxial Al-16wt%Zn; △ columnar Al-16wt%Zn; b) ● equiaxial Zn-16wt%Al; △ columnar Zn-16wt%Al.

Relación entre la Velocidad de Enfriamiento y el Ancho del Grano Columnar

El ancho del grano columnar se puede correlacionar con la velocidad de enfriamiento en el líquido mediante una función del tipo:

$$\lambda = a * (\dot{T})^{-b} \tag{2}$$

donde:

λ es el ancho del grano columnar en mm, a y b son constantes y (\dot{T}) es la velocidad de enfriamiento en °C/min.

Los valores de a y b dependen del sistema de aleación y de la composición como se indica a continuación. Por ejemplo, se ha demostrado que los valores de a y de b son iguales a 3,02 y 1/3 respectivamente para el caso de aleaciones Pb-2%Sn [6]. En la Figura 2 se muestra el caso de la correlación de Al-16%Zn, en la misma se muestra que el ancho disminuye cuando la velocidad de enfriamiento se incrementa, dando valores de a y b de 69,55 y 0,762, respectivamente. Similares correlaciones realizadas en otros sistemas de aleaciones dieron como resultado los valores de a y b que se presentan en la Tabla 1.

En general, el valor de a da el tamaño relativo del grano columnar, mientras que el valor de b da el grado de dependencia del ancho de las columnas con la velocidad de enfriamiento. Por ejemplo, comparando los resultados para las aleaciones Al-Zn con diferentes concentraciones, se observa que el valor de b se incrementa desde 0,66 a 0,76 cuando la concentración se incrementa desde 2 a 16% Zn, mostrando que la sensibilidad en el espaciamiento cambia con los cambios en la velocidad de enfriamiento y con la concentración. Sin embargo, el valor de a se incrementa notablemente entre las aleaciones 2%Zn y 4%Zn y se mantiene aproximadamente constante entre 4%Zn y 16%Zn. Esto indica la sensibilidad relativa del espaciamiento a bajas concentraciones de Zn.

Comparando los resultados para los diferentes elementos, por ejemplo para las aleaciones conteniendo 2%Al y 2%Zn, se observó que tienen una sensibilidad similar con la velocidad de enfriamiento. Sin embargo, el ancho

relativo es alrededor de cinco veces más pequeño para las aleaciones que contienen Al como aleante que aquellas que contienen Zn como aleante. Esto es, las aleaciones Zn-Al producen una estructura más fina comparadas con las aleaciones Al-Zn.

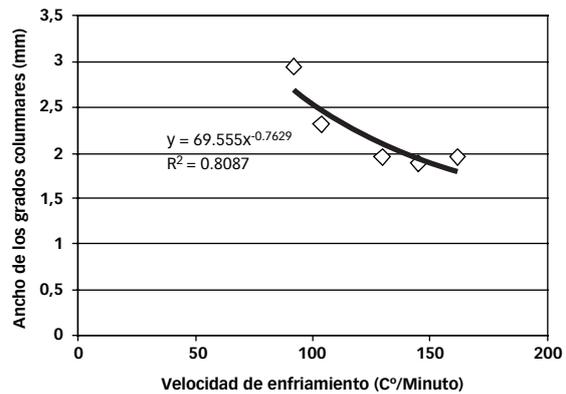


FIGURA 2. Ancho del grano columnar versus velocidad de enfriamiento. Aleación Al-16%Zn. Referencias: ◇ Al-16%Zn.

Tabla 1. Valores de las constantes a, b y C obtenidas a partir de los diferentes sistemas de aleaciones.

Aleación	a	b	C
Al-2%Zn	46,41	0,66	0,36
Al-4%Zn	69,45	0,74	0,22
Al-16%Zn	69,55	0,76	0,25
Zn-2%Al	31,19	0,59	0,33
Zn-4%Al	53,24	0,64	0,25
Zn-16%Al	62,76	0,69	0,31

Relación entre la Longitud de los Granos Columnares con la Velocidad y Posición de los Frentes de Solidificación

Se ha demostrado en un trabajo previo que en las condiciones experimentales de nuestros trabajos, la transición de estructura columnar a equiaxial no es plana sino que ocurre en una región de transición [6]; debido a esto, la longitud de los granos columnares no está definida por la posición del frente sólido cuando ocurre la transición, sino que está entre el inicio y el fin de la transición. Si x_{TCE}^L y x_{TCE}^S son las posiciones de los frentes liquidus y solidus en la transición, la longitud de la zona columnar estará dada por:

$$L_{\text{Col}} = x_{\text{TCE}}^L - C * (x_{\text{TCE}}^L - x_{\text{TCE}}^S) \quad (3)$$

donde C es un parámetro menor que 1, a ser determinado.

El valor de C puede ser obtenido realizando una correlación entre el valor medido de la longitud de los granos columnares y los valores correspondientes a las posiciones de los frentes liquidus y solidus.

El valor de C se vuelve un parámetro asociado al sistema de aleación respectivo, y puede ser utilizado con propósitos de modelización. Los valores calculados de C obtenidos a partir de cada experiencia se listan en la Tabla 1.

Relación entre el Tamaño y la Densidad de Granos Equiaxiales y el Gradiente de Temperatura

El número de núcleos que están presentes en la transición o en otras posiciones después de la transición, que exceden el tamaño de radio crítico, define el número inicial de granos equiaxiales. El crecimiento posterior prosigue de acuerdo con el grado de sobreenfriamiento del líquido. Después del período inicial, puede establecerse que el tamaño de los granos equiaxiales evoluciona siguiendo una relación con la fracción de sólido presente en la región pastosa.

La fracción de sólido se puede determinar asumiendo equilibrio y conociendo el grado de sobreenfriamiento definido como la diferencia instantánea entre las temperaturas de liquidus y solidus y la temperatura local a un tiempo y posición específicos, como $\Delta T(t) = \Delta T_{\text{máx}} f_S(t)$. Donde f_S y $\Delta T_{\text{máx}}$ es la fracción de sólido y es la mayor diferencia entre las temperaturas de liquidus y solidus para el inicio y el fin de la solidificación [6]. De otro modo, la fracción de sólido puede calcularse como $f_S = N_g (4/3) \pi \bar{R}^3$ donde \bar{R} es el radio del grano promedio y N_g es la densidad de granos equiaxiales, combinando ambas se puede obtener:

$$N_g \bar{R}^3 = \frac{3}{4} \pi * \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{\text{máx}}} \right) \quad (4)$$

La relación anterior es descriptiva y requiere conocer el valor de N_g . Si se supone que la densidad de núcleos iniciales no cambia y que la misma define la densidad de granos equiaxiales, conociendo la densidad final de granos equiaxiales como una función de los parámetros de crecimiento resulta un modo simple de describir la evolución de la fracción de sólido y el tamaño de grano equiaxial durante la solidificación.

Relaciones entre la densidad final de granos con los parámetros de crecimiento, como ser el gradiente térmico, no han dado resultados concluyentes. En la Tabla 2 se listan los valores de N_g calculados en tres posiciones en la región equiaxial, las mismas son; en la transición, a 2 cm y a 4 cm de la transición. Se observó una relación lineal entre N_g con el gradiente de temperatura en el líquido adelante de las puntas de las dendritas, G_L , para todas las aleaciones y condiciones en la transición. A 2 cm la relación lineal cae para todos los casos y a

4 cm, la relación lineal cae pero con una constante de proporcionalidad diferente.

Esto es una clara evidencia de que existen otros parámetros, como ser la velocidad de enfriamiento del líquido, que podrían tener alguna influencia en definir el número de núcleos que sobreviven después de la nucleación, particularmente cuando el gradiente de temperatura es bajo como en el caso de la transición y el final de la solidificación. Una indicación de esto es el hecho de que un gradiente grande produce una gran dispersión en el tamaño de grano.

Tabla 2. Densidad de granos, N_g [1/mm³], calculadas en tres posiciones diferentes de las termocuplas a partir de la zona de TCE.

Aleación	N_g (en la TCE)	N_g (2 cm de la TCE)	N_g (4 cm de la TCE)
Al-2%Zn	0,070	0,029	0,035
Al-4%Zn	0,070	0,070	0,021
Al-16%Zn	0,072	0,070	0,124
Zn-2%Al	1,619	0,596	0,418
Zn-4%Al	1,412	0,715	0,696
Zn-16%Al	1,322	0,927	0,715

Espaciamiento Dendrítico Primario (λ_1)

Los valores de $\lambda_1 G^{1/2} V^{1/4}$ se encuentran entre 10 y 221 $\mu\text{m}^{3/4} \text{K}^{1/2} \text{s}^{-1/4}$. La correlación entre λ_1 y $G * V^{1/2}$, donde V es la velocidad del frente de solidificación, no muestra una fuerte dependencia con la concentración de la aleación para cada sistema de aleación, como se puede ver en las Figuras 3 (a) y (b).

Espaciamiento Dendrítico Secundario (λ_2)

Las mediciones de los espaciamientos dendríticos secundarios incluyen los brazos activos e inactivos. Los resultados de las mediciones fueron comparados con los de dos modelos; el modelo teórico de Feurer [10] y el modelo empírico de Grugel [11]. En el caso del modelo de Feurer, los parámetros termofísicos y los datos para cada aleación fueron tomados de la literatura. Utilizando estos datos, se calcularon los coeficientes para λ_2 y el tiempo de solidificación local, t_{SL} , para cada aleación y los resultados se presentan en la Tabla 3. Los resultados también se compararon con la ecuación empírica de Grugel. Ambas ecuaciones se grafican para cada sistema de aleación y composición, junto con las medidas experimentales en la Figura 4. En la figura se puede observar que en todos los casos, un incremento en el tiempo de solidificación local produce un incremento en el espaciamiento dendrítico secundario. Sin embargo, se puede considerar que el mejor ajuste entre los resultados experimentales y los de las predicciones se alcanza con los coeficientes y la ecuación dada por el modelo de Feurer, mientras que el modelo de Grugel predice valores de espaciamientos muy por encima de los valores experimentales. Además, se puede concluir que en ningún caso el espaciamiento dendrítico secundario sigue una ley igual a la raíz cuadrada del tiempo de solidificación local.

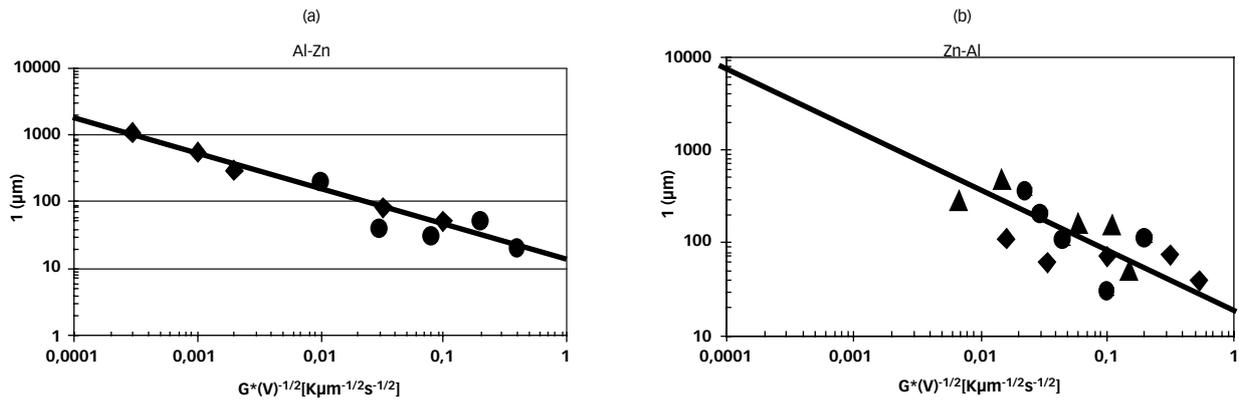


FIGURA 3. Espaciamiento dendrítico primario, λ_1 , como una función de $G^*V^{1/2}$ para (a) Al-Zn y (b) Zn-Al (% en peso). La línea llena indica $\lambda_1 G^{1/2} V^{1/4} = 21,23 \mu\text{m}^{3/4} \text{K}^{1/2} \text{s}^{1/4}$. Referencias: a: ● Al-2wt%Zn; ◆ Al-4wt%Zn; ▲ Al-16wt%Zn; b: ● Zn-4%Al; ◆ Zn-2%Al; ▲ Zn-16wt%Al.

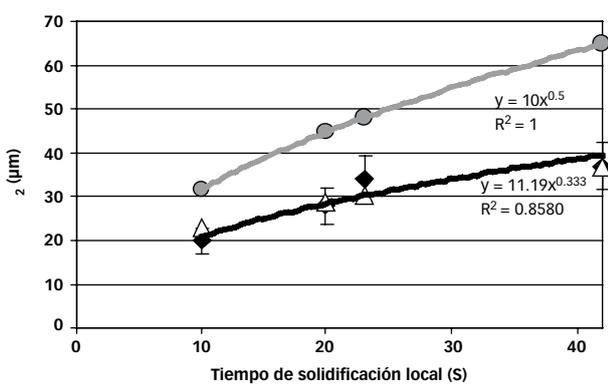


FIGURA 4. Influencia del tiempo de solidificación local sobre el espaciamiento dendrítico secundario experimentalmente determinado y comparado con el resultado de los modelos teórico y empírico. Zn-2%Al. Referencias: ◆ Experimental Zn-2wt%Al; △ Feurer; ● Grugel.

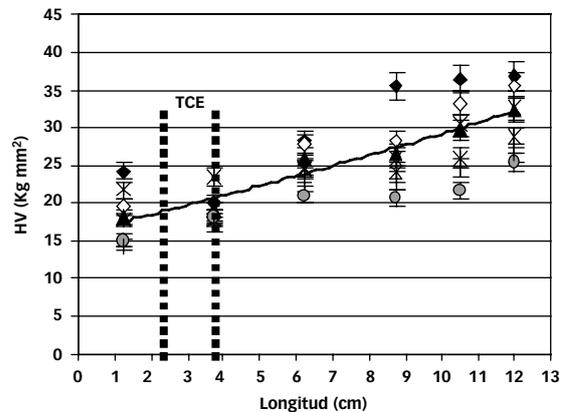


FIGURA 5. Valores de Microdureza versus longitud de las muestras utilizando diferentes cargas. Al-4%Zn. Referencias: ◆ 10 gf; ◇ 50 gf; ▲ 100 gf; × 200 gf; * 300 gf; ● 500 gf; + 1000 gf.

Tabla 3. Ecuaciones obtenidas para el espaciamiento dendrítico secundario utilizando el modelo de Feurer [10] para los diferentes sistemas de aleaciones.

Aleación	Ecuación de Feurer
Al-2%Zn	$\lambda^2 = 13,9 * t_{SL}^{1/3}$
Al-4%Zn	$\lambda^2 = 13,1 * t_{SL}^{1/3}$
Al-16%Zn	$\lambda^2 = 12,8 * t_{SL}^{1/3}$
Zn-2%Al	$\lambda^2 = 11,19 * t_{SL}^{1/3}$
Zn-4%Al	$\lambda^2 = 9,84 * t_{SL}^{1/3}$
Zn-16%Al	$\lambda^2 = 9,38 * t_{SL}^{1/3}$

Microdureza (HV)

En primer lugar, se analizó la variación de microdureza como una función de la longitud de la muestra para todas las probetas de distintas aleaciones (% en peso), utilizando cargas entre 10 g_f y 1000 g_f. La Figura 5 muestra los resultados experimentales.

Se puede apreciar que la microdureza Vickers es mayor en la zona equiaxial que en las zonas columnar y de transición columnar a equiaxial (TCE). Además, en la Figura 5 se puede apreciar que los valores de microdureza muestran una tendencia a disminuir con el incremento de la carga, y los valores se mantienen aproximadamente constantes cuando se utilizan cargas entre 500 g_f y 1000 g_f.

Segundo, se analizó la variación de la microdureza como una función del ancho de la muestra para las mismas

probetas que se utilizaron anteriormente. La Figura 6 muestra los resultados experimentales. En todos los casos obtenemos valores de microdureza mayores en las esquinas y bordes de las muestras, que en las zonas centrales. Las medidas de microdureza realizadas en las probetas solidificadas “as cast” arrojaron valores de microdureza similares a los obtenidos en las zonas equiaxiales de las probetas solidificadas direccionalmente.

Finalmente, analizamos la variación de la microdureza como una función de la concentración. En la Figura 7 presentamos los resultados obtenidos para las aleaciones Al-Zn. De estas figuras se puede deducir que la microdureza de las aleaciones Al-Zn se incrementa con el contenido de aleante, mientras que en el caso de las aleaciones Zn-Al, la microdureza disminuye cuando se incrementa el contenido de aleante.

En el caso de las aleaciones Al-Zn el radio atómico del Zn es menor que el del Al, lo cual produce esfuerzos de tracción en la red con el consiguiente endurecimiento de la aleación. Los valores de microdureza obtenidos en el presente trabajo están en buena concordancia con los reportados en la literatura [12].

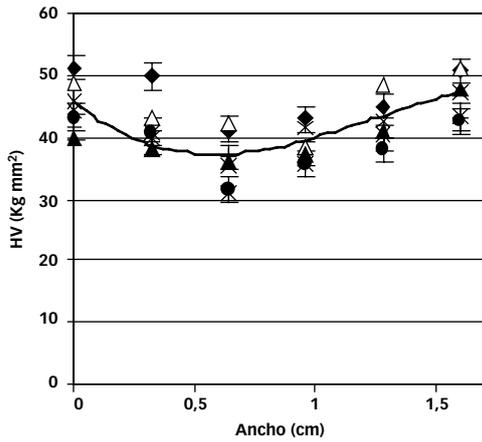


FIGURA 6. Microdureza versus ancho de las muestras para diferentes cargas aplicadas. Al-4%Zn. Referencias: ◆ 10 gf; △ 50 gf; ▲ 100 gf; × 200 gf; * 300 gf; ● 500 gf; + 1000 gf.

Correlación entre el Tamaño de Grano Equiaxial y la Microdureza

En general, se observó en las muestras que la HV se incrementa con el incremento en el tamaño de grano. Ver la Figura 8 para Al-2%Zn.

Correlación entre el Espaciamiento Dendrítico Primario (1) y la Microdureza (HV)

En varias muestras de aleaciones Al-Zn se observó que cuando el espaciamiento dendrítico primario se incrementa, los valores de microdureza también se incrementan. (Ver la Figura 9).

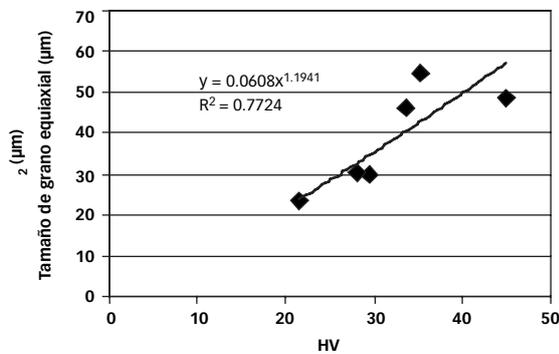


FIGURA 8. Tamaño de grano equiaxial versus HV. Al-2%Zn. Referencias: ◆ Al-2wt%Zn.

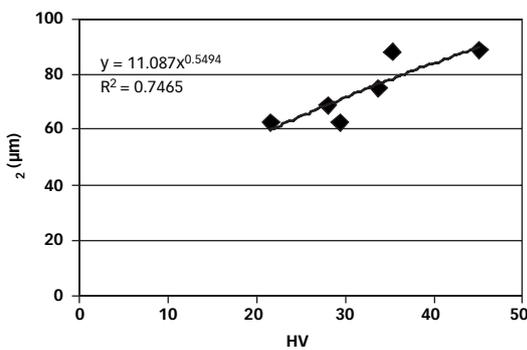


FIGURA 10. Espaciamiento dendrítico secundario versus HV. Al-2%Zn. Referencias: ◆ Al-2wt%Zn.

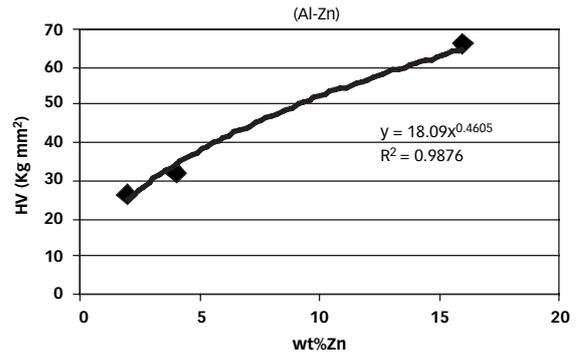


FIGURA 7. Valores de microdureza versus concentración, para una carga de 100 gf. Al-Zn. Referencias: ◆ 100 gf.

Correlación entre el Espaciamiento Dendrítico Secundario, el Tamaño de Grano y la Microdureza

El efecto del espaciamiento dendrítico secundario en las aleaciones ha sido determinado y analizado en dos aspectos. Primero, los resultados de la Figura 10 indican que un incremento en el espaciamiento dendrítico secundario, incrementa levemente los valores de microdureza en aleaciones Al-Zn. Segundo, los resultados de la Figura 11 indican que el espaciamiento dendrítico secundario se incrementa con el incremento en el tamaño de grano. Similares resultados fueron obtenidos en otras aleaciones Al-Zn.

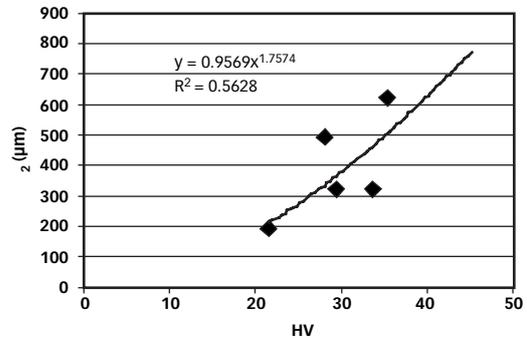


FIGURA 9. Espaciamiento dendrítico primario versus HV. Al-2%Zn. Referencias: ◆ Al-2wt%Zn.

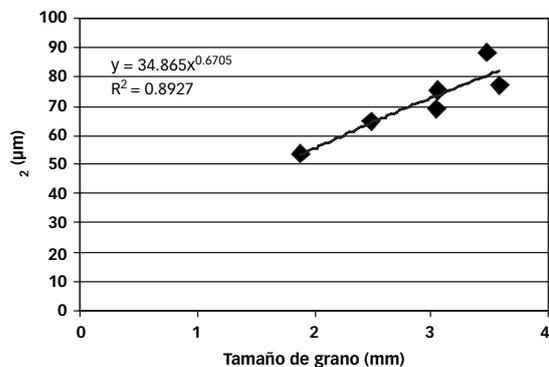


FIGURA 11. Espaciamiento dendrítico secundario versus tamaño de grano. Al-2%Zn. Referencias: ◆ Al-2wt%Zn.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos conducen a las siguientes conclusiones:

1. Se realizaron experiencias de solidificación direccional en aleaciones Al–Zn y Zn–Al en las que se obtuvo la transición de estructura columnar a equiaxial.
2. El ancho de los granos columnares disminuye con la velocidad de enfriamiento siguiendo la relación , donde las constante a y b dependen del tipo de aleación y de la concentración.
3. La longitud de los granos columnares se puede estimar dentro de la región de transición a partir de las posiciones de los frentes y del parámetro C que puede ser determinado para cada aleación.
4. En la mayoría de los casos, la densidad de los granos equiaxiales se relaciona linealmente con el gradiente de temperatura; sin embargo no se ha podido establecer claramente una relación exacta
5. El espaciamiento dendrítico secundario se incrementa con el incremento del tiempo de solidificación local.
6. El modelo de Feurer predice un espaciamiento dendrítico secundario que está en buena concordancia con los valores experimentales.
7. La microdureza Vickers es mayor en la zona equiaxial que en las zonas columnar o de TCE.
8. La microdureza Vickers es mayor en los bordes de las probetas que en el centro de las mismas.
9. La microdureza Vickers disminuye con el incremento de la carga aplicada y los valores muestran una tendencia a mantenerse constantes a cargas elevadas (500 gf a 1000 gf).
10. Los valores de microdureza obtenidos en las probetas “as cast” son similares a los obtenidos en las zonas equiaxiales.
11. Los valores de microdureza obtenidos en el presente trabajo están en buena concordancia con los valores reportados en la literatura.
12. Los valores de microdureza se incrementan con el tamaño de grano en aleaciones Al–Zn.
13. Los valores de microdureza se incrementan con el incremento en el espaciamiento dendrítico primario.
14. Los valores de microdureza se incrementan con el incremento en el espaciamiento dendrítico secundario y en el tamaño de grano en aleaciones Al–Zn.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la ayuda financiera. Uno de los autores (A.E. Ares) agradece al Dr. Rubens Caram por el uso del Laboratorio y equipamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Chalmers, B.** Principles of Solidification, Wiley, New York, NY, p.5, 1964.
2. **Flood, S. C.; Hunt, J. D.** Metals Handbook, 9° Edition, Chapter 15, Casting, p.130, 1988.
3. **Ares, A. E.; Caram, R.; Rios, C. T.; Schvezov, C. E.** Columnar to Equiaxed Transition in 316 L Stainless Steel. EPD Congress 2002. Edited by Patrick R. Taylor, Dhanesh Chandra, and Renato G. Bautista, editors, Seattle, Washington, USA, p. 567–582, 2002.
4. **Ares, A. E.; Rios, C. T.; Caram, R.; Schvezov, C. E.** Dendrite Spacing in Al–Cu and Al–Si–Cu Alloys as Function of the Growth Parameters, Edited by Light Metals 2003, P. Crepeau, Editor, San Diego, California, USA, p. 1055–1062, 2003.
5. **Ares, A. E.; Schvezov, C. E.** Solidification Parameters during the Columnar to Equiaxed Transition in Lead–Tin Alloys, Metall. Trans., 31A: p. 1611–1625, 2000.
6. **Ares, A. E.; Gueijman, S. F.; Schvezov, C. E.** Semi–Empirical Modeling for Columnar and Equiaxed Growth of Alloys, J. Crystal. Growth, 241: p. 235–240. 2002.
7. **Kehl, G.** Fundamentos de la Práctica Metalográfica, Editorial Aguilar, Madrid. p. 12. 1963.
8. **Boyer, H. E.; Gall, T. L.** Metals Handbook, Desk Edition. American Society for Metals. p. 35–18. 35–19. 1990.
9. ASTM, Annual Book of American Society for Testing and Materials, E384–89, 2: p.1. 1997.
10. **Feurer, U.** The Symposium on Quality Control of Engineering Alloys. Delft. p. 131. 1977.
11. **Grugel, R. N.** Secondary and Tertiary Arm Spacing Relationship in Directionally Solidified Al–Si Alloys. Materials Science, 28: p. 677–683. 1993.
12. ASTM, Metals Handbook. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special–Purpose Materials, 2, Tenth Edition. 1990.

Recibido: 13/09/07.

Aprobado: 18/04/08.

• Alicia Esther Ares^{1,2}

Posee el título de Doctora en Ciencia y Tecnología, mención Materiales, además de haber realizado Pos–Doctorados en Universidades de Brasil y Estados Unidos en la misma Área. Se desempeña actualmente como Profesora Adjunta en las Cátedras de Ciencia de los Materiales de la Ingeniería Química y Físico–química Ic. (FCEQyN–UNaM). Además, es Miembro de la CIC del CONICET y posee actualmente la Categoría I en el Sistema Nacional de Incentivos a los Docentes–Investigadores.

• Sergio Fabian Gueijman²

Posee el título de Magíster en Ciencia y Tecnología de los Materiales y ha realizado varios cursos con nivel de Doctorado en Universidades de Estados Unidos. Se desempeña actualmente

como Profesor Adjunto en la Cátedra de Física General (FCE-QyN–UNaM). Además, posee la Categoría III en el Sistema Nacional de Incentivos a los Docentes–Investigadores.

• Carlos Enrique Schvezov^{1,2}

Posee el título de Ph. D. de la Universidad de British Columbia, Canadá. Se desempeña actualmente como Profesor Titular en la Cátedra de Matemática Aplicada (FCEQyN–UNaM), es Miembro de la CIC del CONICET y actualmente tiene la Categoría I en el Sistema Nacional de Incentivos a los Docentes–Investigadores.

También, se desempeña como Director del CEDIT/Gobierno de la Provincia de Misiones.

1– Miembro de la CIC del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

2– Programa de Materiales, Modelización y Metrología. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones. Félix de Azara 1552. (3300). Posadas, Misiones, Argentina. aares@fceqyn.unam.edu.ar.