

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y MICRODUREZA EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO Y TIPO DE ESTRUCTURA DE ALEACIONES ZA1 HIPOEUTÉCTICAS Y ZA5 EUTÉCTICAS

TENSILE RESISTANCE AND MICROHARDNESS IN FUNCTION OF TYPE AND SIZE OF STRUCTURE OF ZA1 HIPOEUTECTIC AND ZA5 EUTECTIC ALLOYS

A.E. Ares^{1,2,*}, **S.F. Gueijman**² y **C.E. Schvezov**^{1,2}

¹ CONICET.

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

aares@fceqyn.unam.edu.ar

Entre las propiedades mecánicas dependientes de la microestructura del material, se pueden citar el límite de resistencia a la tracción, la elongación, la tenacidad, el límite de resistencia a la fatiga, la resistencia a la fluencia, la resistencia a la corrosión y a la abrasión, además de las conductividades térmicas y eléctricas. Resulta de importancia para la Industria Metalúrgica determinar expresiones que correlacionen determinadas propiedades mecánicas con los parámetros estructurales, abordando sistemas metálicos de interés industrial, como es el caso de las aleaciones Zinc-Aluminio (ZA). De esta forma, los espaciamentos dendríticos dependientes de las condiciones térmicas durante el proceso de solidificación tendrán una estrecha relación con los parámetros térmicos y las propiedades mecánicas en evaluación. En el presente trabajo se analiza la variación de los parámetros obtenidos de los ensayos de tracción y de microdureza en función de la concentración de la aleación (Zn-1%Al y Zn-5%Al) y del tipo y tamaño de estructura obtenida durante la solidificación direccional. En la estructura se determina el tamaño de grano, g_s , en las zonas columnares, equiaxiales y con transición de estructura columnar a equiaxial (TCE) y los tamaños de los espaciamentos dendríticos secundarios, λ_2 , en las zonas de fractura de las piezas ensayadas. Los parámetros mecánicos determinados son la microdureza Vickers (HV) y los parámetros obtenidos de los ensayos de tracción, esto es, la tensión máxima (TS), la tensión de fluencia (YS), y la tensión de ruptura del material (UTS). Los resultados preliminares indican que las aleaciones eutécticas (Zn-5%Al) son más resistentes que las aleaciones hipoeutécticas (Zn-1%Al). Se presenta y analiza la dependencia de las propiedades mecánicas con el tipo y tamaño de grano y de espaciamiento dendrítico y eutéctico en los dos sistemas de aleación.

Palabras claves: Aleaciones Zn-Al hipoeutécticas y eutécticas, parámetros estructurales, resistencia a la tracción, microdureza.

Among the mechanical properties dependent on the microstructure of the material, can be mention the limit of tensile strength, elongation, tenacity, resistance to fatigue, creep resistance, corrosion resistance and abrasion as well as thermal and electrical conductivities. For Metallurgical Industry it is important to identify expressions correlating mechanical properties with structural parameters utilizing metal systems of industrial interest, such as zinc-aluminum alloys (ZA). Thus, dendritic spacings dependent on thermal conditions during the solidification process will have a close relationship with the thermal parameters and mechanical properties evaluation. This paper analyzes the variation of the obtained parameters from tensile tests according to the concentration of the alloy (Zn-1wt%Al and Zn-5wt%Al) and the type and size of structure obtained during directional solidification. The grain size, g_s , in columnar, equiaxed and columnar to equiaxed transition (CET) zones was measured. Also, the sizes of the secondary dendritic spacing, λ_2 , on the fracture zones of the tested samples were determined. The mechanical parameters determined are Vickers Microhardness (HV) and the parameters obtained from tensile tests, which are maximum tensile strength (TS), yield strength (YS), and ultimate tensile strength (UTS) of the material. Preliminary results indicate that the eutectic alloys (Zn-5wt%Al) are more resistant than hypoeutectic alloys (Zn-1wt%Al). The dependence of the mechanical properties with the type and size of grains and dendritic and eutectic spacings in both alloy systems it presents and analyzes.

Keywords: Zn-Al hypoeutectic and eutectic alloys, structural parameters, tensile resistance, microhardness.

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

I. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones base zinc industrialmente usadas para coladas bajo presión se denominan “zamac y za”. Son aleaciones de zinc con adición de aluminio, cobre, plata y magnesio. Estas aleaciones poseen mejor área de aplicación, debido a sus particulares propiedades físicas, mecánicas y de fundición. La gran fluidez de esas aleaciones facilita la obtención de piezas de compleja forma y paredes finas [1,4].

Los parámetros estructurales tales como el tamaño de grano y los espaciamentos dendríticos son muy influenciados por el comportamiento térmico del sistema metálico y del molde durante la solidificación. Las propiedades mecánicas de una aleación dependen del arreglo microestructural (espaciamentos dendríticos y tamaños de granos) [1-3].

La creación de nuevas aleaciones base zinc son de un interés especial debido a la gran variedad de usos que se les puede dar a las mismas, teniendo en cuenta la necesidad industrial de obtener de ellas una variedad de propiedades necesarias para la fabricación de piezas estructurales. Entonces, a fin de utilizar estas aleaciones metálicas en aplicaciones específicas, es necesario conocer su respuesta a determinados ensayos mecánicos, tales como los ensayos de tracción y de dureza y su dependencia con la estructura [5,6].

El objetivo de la presente investigación consiste en estudiar la influencia de los principales parámetros mecánicos de los ensayos de tracción y de dureza sobre el tipo de estructura de grano (columnar, equiaxial o con transición de estructura columnar a equiaxial, TCE); y en el espaciamento dendrítico secundario en aleaciones Zn-Al (ZA), específicamente las aleaciones Zn-1%Al y Zn-5%Al, porcentaje en peso.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El dispositivo de solidificación direccional fue descrito previamente en otros trabajos publicados, ver Figura 1 [7-9]. Las aleaciones Zn-1%Al y Zn-5%Al fueron preparadas y solidificadas direccionalmente a partir de zinc grado electrolítico (99.999 % en peso) y de aluminio grado comercial (99.96 % en peso) en tubos de vidrio Pirex® de 24 mm de diámetro externo. Las mediciones de temperatura fueron realizadas utilizando termocuplas tipo K protegidas con tubos de vidrio de pequeño diámetro (4 mm de diámetro externo).

Luego de la solidificación unidireccional, las probetas fueron cortadas longitudinalmente y desbastadas utilizando papeles de diferentes granulometrías, desde grado 80 hasta grado 1200, y luego pulidas con pasta de diamante de 1 μ m. El ataque químico para revelar la macroestructura fue realizado con ácido clorhídrico concentrado durante aproximadamente 60 segundos a temperatura ambiente (25°C) seguido de la remoción y limpieza de los depósitos negros (Ver Figura 2). Para revelar la microestructura se utilizó el reactivo de Palmerston (5 g CrO₃, 0.5 g Na₂SO₄ y 100 ml H₂O) [10]. El tiempo de ataque varió entre 5 y 15 s, dependiendo del contenido de soluto de la aleación. Luego, las muestras fueron sumergidas en una solución conteniendo 20 g CrO₃ y 100 ml H₂O antes del análisis mediante microscopía óptica utilizando MEB y un microscopio óptico Arcano® a fin de medir el espaciamento dendrítico promedio en cada zona de las probetas (se realizaron 10 mediciones en cada posición de la probeta). El espaciamento dendrítico secundario, λ_2 , fue medido mediante el método de intercepción lineal, esto es, contabilizando el número de intercepciones sobre una línea recta. A modo de ejemplo, en la Figura 3 se grafican los valores de los espaciamentos dendríticos secundarios y de los espaciamentos eutécticos en función de la distancia desde la base de las probetas de las aleaciones ZA1 y ZA5. Se puede apreciar que tanto el λ_2 como el λ se incrementan desde la zona columnar (zona inferior) a la zona equiaxial (zona superior) de las probetas.

A fin de medir el tamaño de grano equiaxial, a partir de la transición de estructura columnar a equiaxial, TCE, se dividió a cada probeta en intervalos iguales. En cada intervalo se determinó el diámetro medio de los granos equiaxiales según la norma ASTM E 112. También, se dividió la zona columnar en intervalos iguales y se midió el ancho y la longitud de los granos columnares en cada intervalo. En las Figuras 4 (a) y (b) se presentan los resultados de la medición del tamaño promedio de los granos en función de la distancia desde la base de la probeta para las dos aleaciones distintas, obtenidos a partir de los histogramas determinados. Se logró el ajuste de los puntos mediante una función tipo polinómica de grado 3. Se observa en la Figura 4 (a), por ejemplo, para la experiencia con Zn-1%Al, que el tamaño promedio de los granos equiaxiales es menor en la zona de la TCE, aumentando hasta un valor máximo de 3 mm de tamaño de grano en el último intervalo de la zona equiaxial de la probeta. El ancho del grano columnar aumenta con la distancia desde la base de la muestra. Similar procedimiento se siguió con las demás macrografías utilizadas para el análisis. Se puede apreciar que la variación del tamaño de grano en función de la distancia a partir de la TCE obtenida es similar en todos los casos analizados y que es independiente de la posición de la transición, concentración de la aleación y tamaño máximo de grano equiaxial alcanzado.

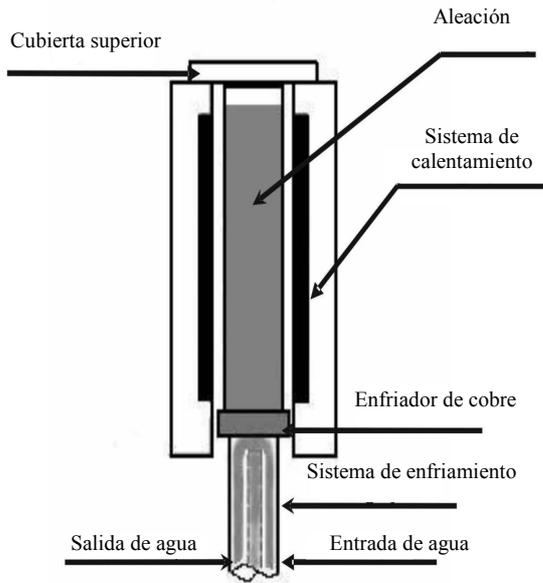


Figura 1. Esquema del dispositivo de solidificación direccional.

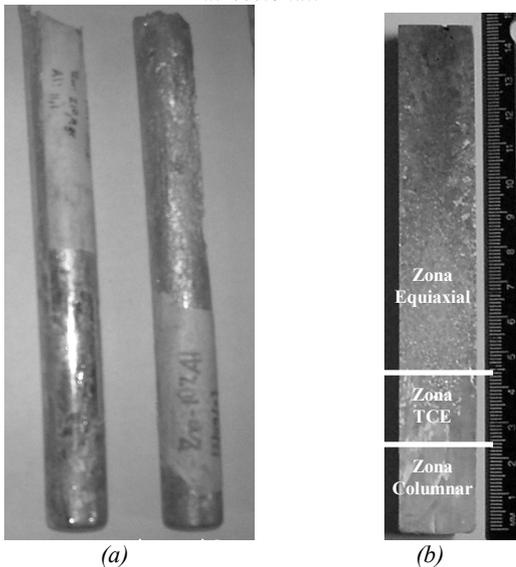


Figura 2. (a) Probetas solidificadas direccionalmente. (b) Macrografía de una probeta de aleación ZA1 mostrando las tres zonas: columnar, TCE y equiaxial.

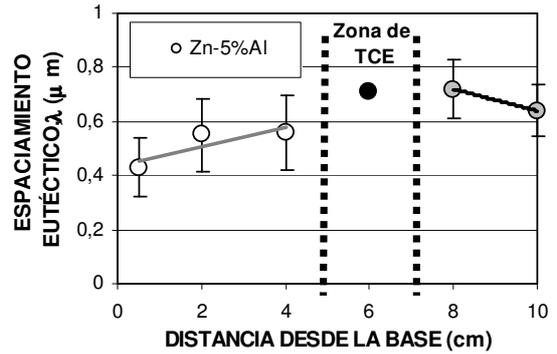
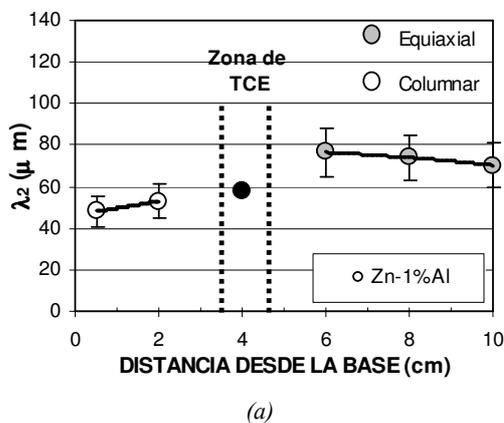


Figura 3. (a) Espaciamiento dendrítico secundario, λ_2 , y (b) espaciamiento eutéctico, λ , versus distancia desde la base.

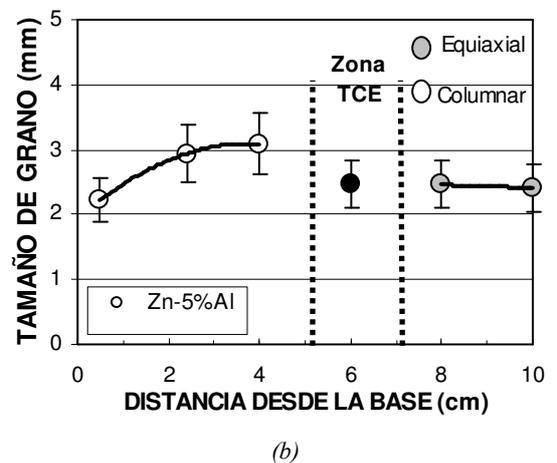
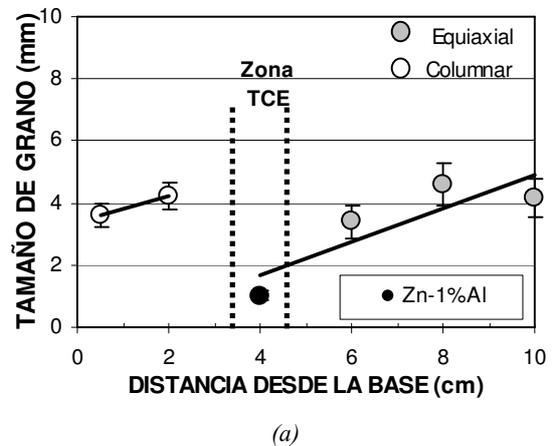
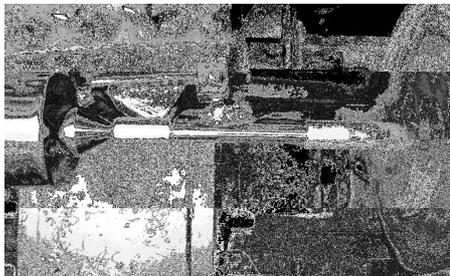


Figura 4. Tamaño de grano, g_s , versus distancia desde la base. (a) Zn-1%Al (b) Zn-5%Al.

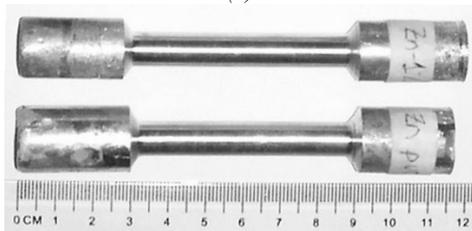
Para los ensayos de tracción las probetas fueron torneadas a fin de darles la forma y dimensiones requeridas según la norma específica, ver detalles en la Figuras 5 (a) y (b). Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo a la normas NBR 6152 y ASTM /E-8M [11] y utilizando la máquina para ensayos de tracción marca SHIMADZU DE 100 KN de capacidad máxima con extensómetro, lectura digital de carga y graficador, Figuras 5 (c) y (d).

Luego del ensayo, cada sección longitudinal de las probetas traccionadas (Figura 5 (d)) fue cortada transversalmente, desbastada con lijas de diferentes granulometrías y atacada químicamente con HCl (aprox. 70%) durante un tiempo aproximado de 120 segundos [10] a fin de ver qué tipo de estructura (columnar, TCE o equiaxial) presentó cada probeta en la zona de la fractura, y correlacionar el tipo de estructura con los principales parámetros del ensayo de tracción.

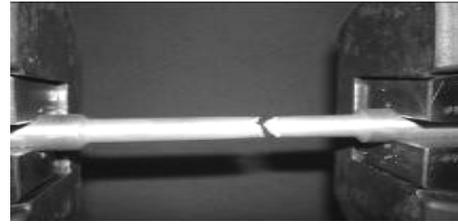
Los ensayos de microdureza Vickers (HV) se realizaron a temperatura ambiente, utilizando un microdurómetro Buehler®. Se utilizaron cargas de 500 gr y 1000 gr. Las mediciones fueron realizadas siguiendo la norma ASTM E 384-89 [12], utilizando un tiempo de impresión de 15 segundos. A fin de determinar la microdureza promedio en cada zona de la probeta se realizaron un mínimo de 10 impresiones. En la Tabla I se presentan los valores de los parámetros obtenidos en los ensayos mecánicos.



(a)



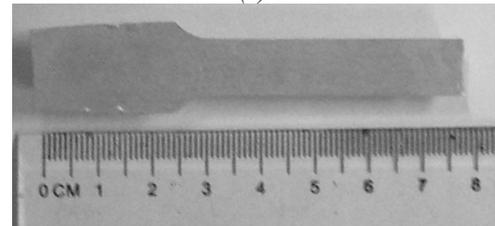
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5. Detalle experimental de la preparación de las probetas para los ensayos de tracción.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron un total de 10 experiencias de solidificación direccional y ensayos de tracción. Los valores de tensión de fluencia (YS), tensión máxima (TS) y tensión de ruptura (UTS) para todos los ensayos realizados con aleaciones eutécticas (Zn-5wt%Al) y aleaciones hipoeutécticas (Zn-1wt%Al) se presentan en la Tabla I. En la misma tabla también se presentan los valores promedios de microdureza en las zonas de fractura de las probetas, además, los valores promedio de espaciamiento dendrítico secundario, λ_2 , y de tamaño de grano, g_s .

Tabla I. Valores de los parámetros de los ensayos mecánicos para cada zona y concentración de aleación.

Aleación	Tensión Máxima (MPa)	Tensión de Fluencia (MPa)	Tensión de Ruptura (MPa)	Microdureza (HV)	Tipo de Estructura	λ_2 Promedio (μm)	$\lambda_{\text{Promedio}}$ (μm)
Zn-1%Al	137.65	80.79	113.61	40.8	Columnar	33.51	-----
Zn-1%Al	166.93	77.61	158.19	39.4	Columnar	41.23	-----
Zn-1%Al	159.74	72.44	126.99	42.3	Equiaxial	40.52	-----
Zn-1%Al	158.37	65.01	150.37	41.5	Equiaxial	32.90	-----
Zn-1%Al	140.14	62.33	100.64	43.2	Equiaxial	32.50	-----
Zn-5%Al	130.61	61.22	99.73	34.3	Columnar	-----	0.29
Zn-5%Al	136.14	62.39	112.06	36.8	Columnar	-----	0.21
Zn-5%Al	122.55	71.65	114.59	33.9	TCE	-----	0.15
Zn-5%Al	138.17	73.57	109.26	34.7	Equiaxial	-----	0.09
Zn-5%Al	129.79	78.19	102.15	35.1	Equiaxial	-----	0.12

Cuando se grafican la YS y la TS en función del espaciamiento dendrítico secundario, λ_2 , y del tamaño de grano, g_s , se puede observar que ambas tensiones se incrementan con el aumento del λ_2 (Figuras 6 y 7 (a) y (b)). Se puede apreciar en las figuras que se incluyen los valores de las tensiones en ambas zonas, columnar y equiaxial de las probetas. Se observa que los valores de las tensiones son mayores en las zonas columnares que en las equiaxiales de las probetas.

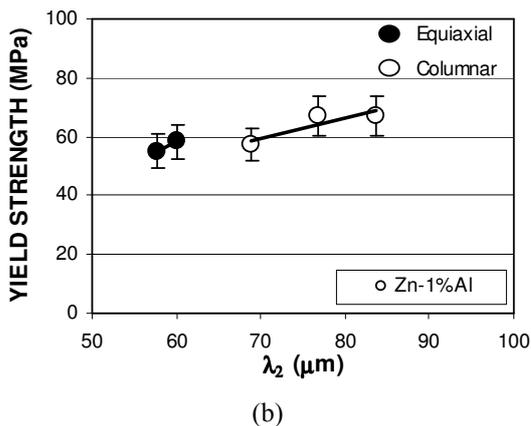
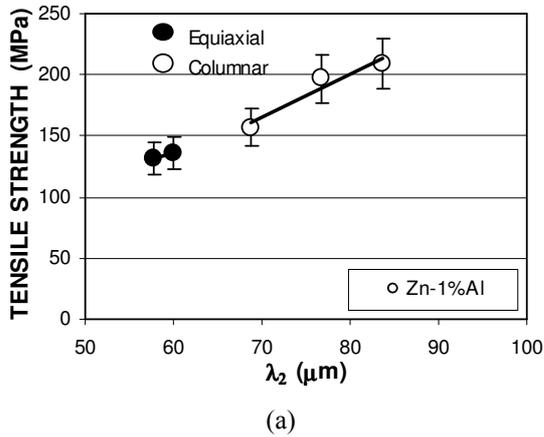


Figura 6. (a) Tensión máxima y (b) Tensión de fluencia como una función de λ_2 .

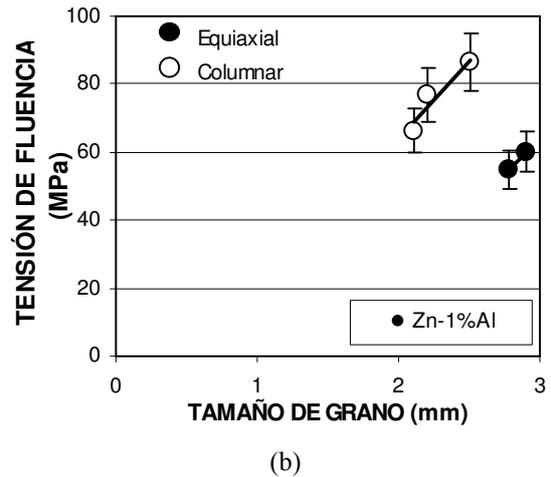
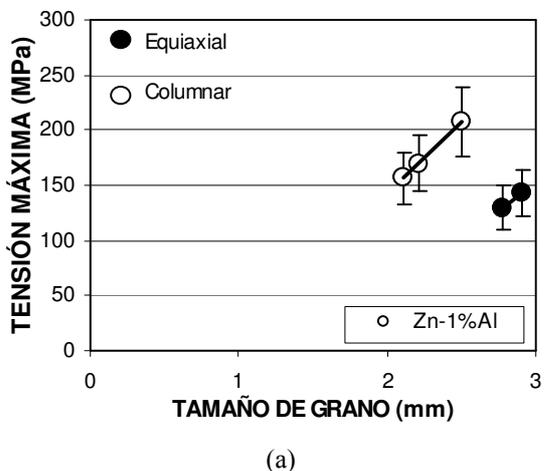


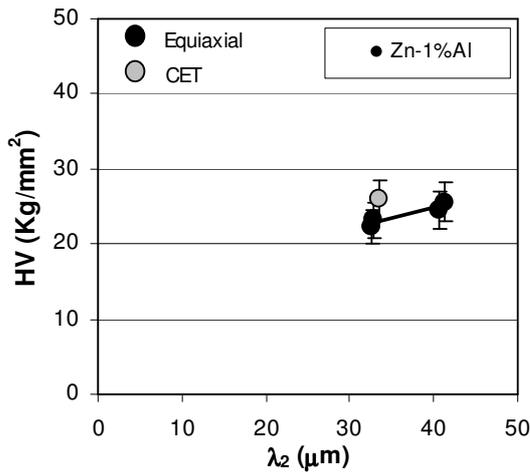
Figura 7. (a) Tensión máxima y (b) Tensión de fluencia como una función de g_s .

De las figuras anteriores se puede apreciar que existe una relación que indica que el tamaño de grano se incrementa con el incremento del λ_2 en ambas regiones; columnar y equiaxial. Sin embargo, la relación es diferente en cada zona, mostrando que para un dado tamaño de grano en la zona columnar se forma un λ_2 de mayor tamaño que en la zona equiaxial.

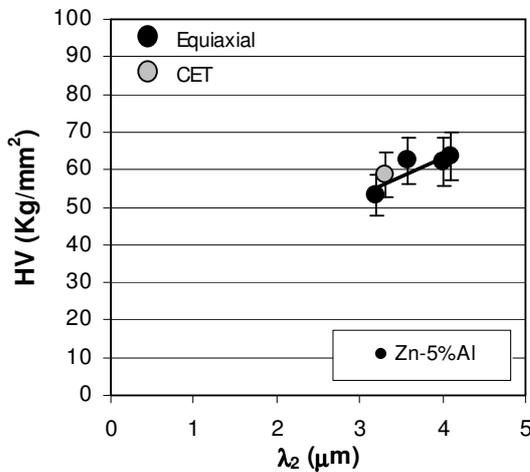
En el caso de la microdureza, la correlación de los resultados experimentales con el espaciamiento dendrítico secundario, λ_2 , y con el espaciamiento eutéctico, λ , dan los resultados que se presentan en las Figuras 8 (a) y (b), respectivamente. Se puede observar que la HV se incrementa con el incremento de ambos, λ_2 y λ , y además, que existe una buena correlación lineal entre ambos parámetros, independientemente de si es el espaciamiento dendrítico o el eutéctico.

Si se correlaciona la tensión máxima (TS) con la velocidad de crecimiento, R, (Figura 9) se observa un incremento en los valores de las tensiones con el incremento en la velocidad de crecimiento, sin embargo, este incremento es mayor en la zona columnar de las probetas.

Por último, si se correlaciona la tensión máxima, TS, con el valor promedio de microdureza Vickers, HV, en la zona de fractura de las muestras, ver Figura 10, es posible ver que la tensión máxima y la microdureza Vickers se incrementan con el incremento en la velocidad de crecimiento, R.



(a)



(b)

Figura 8. Microdureza Vickers versus (a) λ_2 y (b) λ .

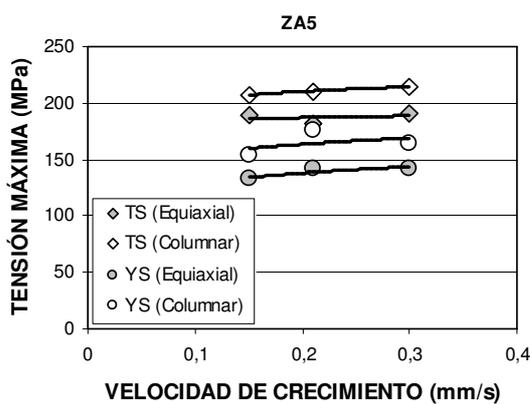


Figura 9. Variación de la tensión máxima, TS, con la velocidad de crecimiento, R

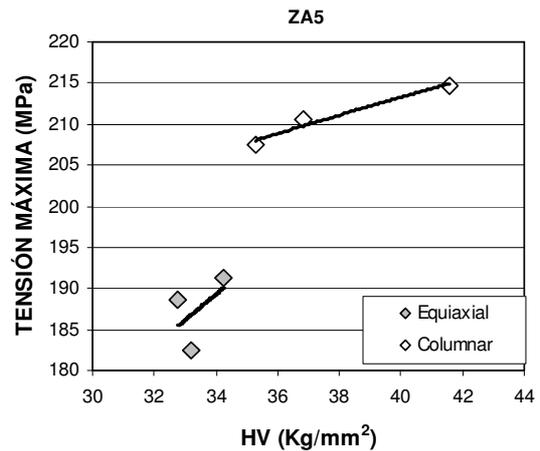


Figura 10. Variación de la tensión máxima, TS, con la microdureza, HV

IV. CONCLUSIONES

Los principales resultados obtenidos en la presente investigación son los siguientes:

- 1) Se obtuvieron probetas de aleaciones Zn-1wt%Al y Zn-5wt%Al con los tres tipos de estructuras, columnar, equiaxial y con transición de estructura columnar a equiaxial.
- 2) El espaciamiento dendrítico secundario se incrementa desde la zona columnar a la zona equiaxial en las probetas.
- 3) Existe una correlación directa entre las propiedades mecánicas, YS, TS y HV con λ_2 , λ y g_s , independientemente del tipo de estructura, columnar o equiaxial.
- 4) A temperatura ambiente, las propiedades mecánicas, YS, TS y HV se incrementan con el incremento de la velocidad de crecimiento, R, y los valores son mayores en la zona columnar de las probetas.
- 5) La TS se incrementa con el incremento en la HV y ambas dependen en la misma forma con R.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el CONICET y por la Agencia.

Referencias

1. Birch, J. New Alloys for Zinc Castings, Material & Design, **11**, 83-87 (1990).
2. Savaskan, T., Purcek, G., Hekimoglu, A. P. Effect of Copper Content on the Mechanical and Tribological Properties of Zn-27Al-Based Alloys, Tribology Letters, **15**, 257-263 (2003).

3. Durman, M. Microstructures and Hot Tensile Properties of Pressure-Die Cast and Gravity Cast Commercial Zinc-Based Alloys, *Zeitschr. Metallk.*, **89**, 417–423 (1998).
4. Pehlke, R.D., Jeyarajan, A., Wada, H. Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials. University of Michigan. Michigan. 182 (1982).
5. ASTM E 8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. American Society of Testing and Materials (1995).
6. Berry, J.T. Effects of Solidification Conditions on Mechanical Behavior of Al Cast Alloys, *AFS Trans.*, **78**, 421–428 (1970).
7. Ares, A.E., Gatti, I.P., Gueijman, S.F., Schvezov, C.E. Mechanical Properties of Zinc – Aluminum Alloys Versus Structural and Thermal Parameters, *Modelling of Casting, Welding and Advances Solidification Processes – XII*, Edited by S.L. Cockcroft and D.M. Maijer, TMS 659-666 (2009).
8. Ares, A.E., Schvezov, C.E. Solidification Parameters during the Columnar to Equiaxed Transition in Lead Tin Alloys, *Metall. Trans.*, **31^a**, 1611-1625 (2000).
9. Ares, A.E., Schvezov, C.E. Influence of Solidification Thermal Parameters on the Columnar-to-Equiaxed Transition of Aluminum-Zinc and Zinc-Aluminum Alloys, *Metall. Trans.*, **38A** 1485-1499 (2007).
10. Kehl, G. *Fundamentos de la Práctica Metalográfica*, Editorial Aguilar, Madrid (1963).
11. Tensile Test NBR 6152 Norm.
12. ASTM, *Annual Book of American Society for Testing and Materials*, E384-89, 1,2 (1997).