

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA MICRODUREZA VICKERS EN PROBETAS OBTENIDAS DURANTE LA SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL DE DIFERENTES ALEACIONES

A.E. Ares ¹, R. Caram ², and C.E. Schvezov ³

1 CONICET – U. of Florida, Department of Materials Science and Engineering, Gainesville, FL, USA.

2 Departamento de Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. C.P. 6122 - CEP: 13083-970. Campinas, SP, Brazil.

3 Departamento Físico-Matemático, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones. Félix de Azara 1552. 3300 Posadas-Misiones.

aares@mse.ufl.edu

En el presente trabajo se realiza un estudio de la variación de la microdureza con las diferentes estructuras formadas, columnar, equiaxial y con transición de estructura columnar a equiaxial. TCE, en aleaciones Al-Cu, Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Al₂O₃, Al-Li-Cu-Mg, Al-Mg, Al-Zn y Cu-Zn-Pb solidificadas direccionalmente empleando diferentes cargas. Las medidas de microdureza fueron realizadas a temperatura ambiente con un microdurómetro Buehler, con cargas entre 10 y 1000 gf. Se analizan las variaciones de la microdureza en función de la longitud y el ancho de las probetas, y además, en función de la concentración. Se observó que los valores de microdureza tienden a disminuir con el aumento de la carga, por lo tanto tienen una tendencia a permanecer constantes con cargas más elevadas. También, se observó que las aleaciones en el estado bruto de fusión exhiben una mayor microdureza que cuando se las solidifica direccionalmente. Se analizan y discuten los resultados obtenidos.

In the present work we analyze the variations in microhardness as a function of both microstructure and load applied in Al-Cu, Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Al₂O₃, Al-Li-Cu-Mg, Al-Mg, Al-Zn and Cu-Zn-Pb alloys directionally solidified. The microstructures analyzed were columnar, equiaxed and columnar to equiaxed (CET) transition zones. Microhardness measurements were made at room temperature using a Buehler microdurometer and loads between 10 and 1000 gf were used. Furthermore, variations in microhardness as a function of concentration and as a function of both sample length and width are reported. We notice that the microhardness values decrease when the load increase and reach almost constant values at higher loads. We observed that bulk alloys have greater microhardness values than those directionally solidified. The experimental results are analyzed and discussed.

I. INTRODUCCIÓN

Las mediciones de dureza o microdureza brindan información sobre la resistencia en relación a la deformación plástica, al desgaste, al corte, o al riesgo de penetración de un material en otro. La diferencia entre microdureza y dureza, no está bien definida debido a que depende del tipo de carga y del equipamiento utilizado. Souza⁽¹⁾ sostiene que se consideran medidas de microdureza cuando las cargas que se emplean son menores a 1 kgf y las impresiones son microscópicas. Mientras que se consideran medidas de dureza cuando las cargas varían entre 1 a 120 kgf. Ambas medidas utilizan como penetrador un diamante que es prácticamente inderformable y como todas las impresiones son semejantes entre sí, sin importar su tamaño, la dureza Vickers (HV) es independiente de la carga, esto es, el número de dureza obtenido es el mismo cualquiera sea la carga utilizada para materiales homogéneos, lo cual brindará la misma información. Mientras que,

debe tenerse en cuenta la carga y el tiempo de impresión. De acuerdo con Souza⁽¹⁾, la dureza disminuye con la aplicación de cargas muy bajas, menores a 20 gf. Según Li et al.⁽²⁾, la relación entre carga y microdureza no es muy clara, así sea, un tema muy estudiado. Li et al.⁽²⁾ indican que usualmente la dureza aumenta con cargas menores, lo que es demostrado en el material cerámico α -SiC. Por esto, es necesario mencionar la carga toda vez que un material es ensayado.

El objetivo del presente trabajo es el de analizar las variaciones de la microdureza en función de la longitud y el ancho de probetas de aleaciones Al-Cu, Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Al₂O₃, Al-Li-Cu-Mg, Al-Mg, Al-Zn y Cu-Zn-Pb solidificadas direccionalmente.

También, analizar la variación de la microdureza de las aleaciones en función de la concentración y del estado bruto de fusión respecto a cuando se las solidifica direccionalmente.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La correlación entre la estructura y la microdureza fue obtenida por la realización de la solidificación direccional de las aleaciones Al-Cu, Al-Si, Al-Li, Al-Mg, Al-Zn, Cu-Zn, donde la velocidad de crecimiento, el perfil de temperatura en el líquido y la dirección de crecimiento, pueden ser, dentro de ciertos límites, controlados.

Las aleaciones fueron solidificadas direccionalmente en un equipo de solidificación direccional con un arreglo de termocuplas para medidas del perfil térmico en la muestra durante el proceso de crecimiento^(3,4).

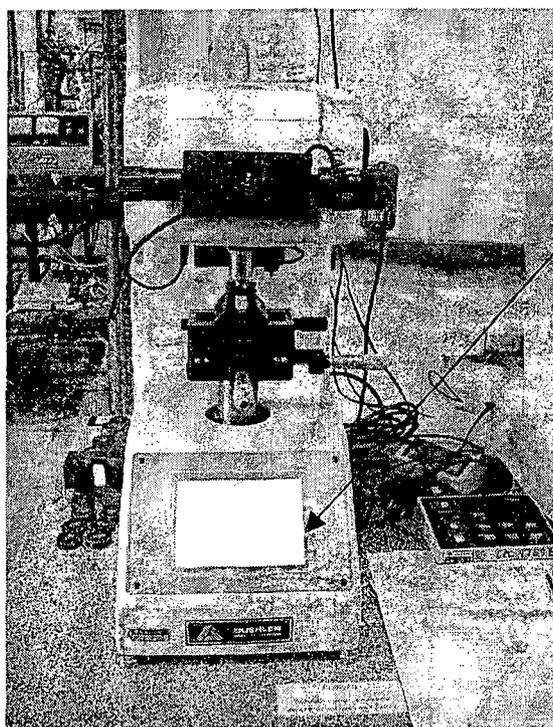
Después de la solidificación direccional, una de las secciones transversales de cada muestra fue cortada en las posiciones donde se colocaron las termocuplas, cada una de las seis secciones fue embutida en moldes de resina y pulida mecánicamente con lijas de diferentes granulometrías y por último con paños de hasta 0.25 μm . Para

analizar la microestructura, las muestras fueron atacadas químicamente con distintas soluciones⁽⁵⁾.

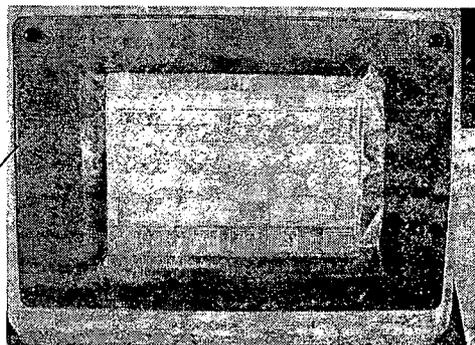
Las medidas de microdureza fueron realizadas a temperatura ambiente en un microdurómetro Buehler, ver figura 1, con cargas entre 10 gf a 1000 gf. Las medidas fueron realizadas según la norma ASTM E 384-89⁽⁶⁾, con un tiempo de impresión de 15 segundos en las muestras en el estado bruto de fusión de las distintas aleaciones y en las muestras solidificadas direccionalmente. Para la determinación de la microdureza media, fueron realizadas un mínimo de 10 impresiones. La microdureza Vickers (HV) fue determinada utilizando la ecuación:

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

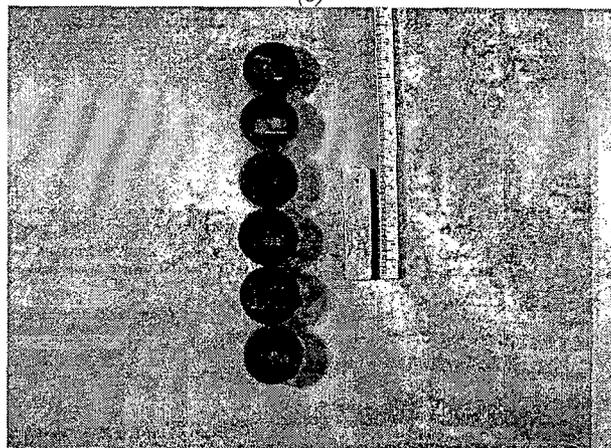
donde, Q es la carga en gramos-fuerza, y a es la longitud de las diagonales en μm .



(a)



(b)



(c)

Figura 1. (a)-(b) Microdurómetro Buehler utilizado para realizar las mediciones de microdureza. (c) Secciones de una probeta donde se realizaron las mediciones de microdureza.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En primer lugar, se analizó la variación de la microdureza en función de la longitud de las probetas de Al-2%Cu, Al-4%Cu, Al-10%Cu, Al-20%Cu, Al-33.2%Cu, Al-10%Si-2.5%Cu, Al-5%Si, Al-5%Si-

12%Al₂O₃, Al-1.2%Li-2.0%Cu-1.0%Mg, Al-2%Mg, Al-4%Mg, Al-2%Zn, Al-4%Zn, Cu - 36%Zn - 2.8%Pb (% en peso), empleando cargas de 10 gf, 50 gf, 100 gf, 200 gf, 300 gf, 500 gf y 1000 gf. En las figuras 1 (a) a (n) se presentan los resultados del análisis.

Se puede apreciar en las figuras que la microdureza Vickers es mayor en la zona equiaxial de las probetas que en las zonas columnar y de transición de estructura columnar a equiaxial, TCE.

En el caso de la aleación Al-1.2%Li-2.0%Cu-1.0%Mg no se obtuvieron estructuras columnares ni con TCE, solamente estructuras equiaxiales; se puede apreciar en la figura 1 (i) que la microdureza se mantiene aproximadamente constante en la longitud de la probeta.

También se puede apreciar en las figuras 1 (a) a (n) que los valores de microdureza tienden a disminuir con el aumento de la carga, por lo tanto tienen una tendencia a permanecer constantes con cargas más elevadas (500 – 1000 gf).

En segundo lugar, se analizó la variación de la microdureza en función del ancho de la probeta para las mismas concentraciones y cargas mencionadas anteriormente. En las figuras 2 (a) a (n) se presentan los resultados obtenidos de este análisis.

En todos los casos se obtuvieron valores mayores de microdureza en los bordes de las probetas, disminuyendo en la zona central de las mismas.

Las mediciones de microdureza realizadas en las muestras en el estado bruto de fusión dieron valores similares a los obtenidos en las mediciones de las zonas equiaxiales de las probetas, ver tabla 2 y figura 1.

Por último, se analizó la variación de la microdureza con la concentración del elemento aleante. En las figuras 3 (a) a (c) se presentan los resultados obtenidos para las aleaciones a) Al-Cu, b) Al-Mg y c) Al-Zn.

Se puede apreciar que en el caso de las aleaciones Al-Cu y Al-Zn la microdureza aumenta con la concentración de aleante, figuras 3 (a) y 3 (c), mientras que en caso de las aleaciones Al-Mg la dureza disminuye con el aumento de la concentración de aleante.

En el caso del Al-Cu y Al-Zn los radios atómicos del cobre y del zinc son menores que el radio atómico del aluminio, ver tabla 1, lo cual produce esfuerzos de tracción en la red con el consiguiente endurecimiento de la aleación.

En el caso del Al-Mg el radio atómico del magnesio es más grande que el del aluminio, lo cual produce esfuerzos de compresión en la red, produciendo un endurecimiento de la aleación. La diferencia entre los radios atómicos del aluminio y el magnesio, es la mayor de todas las aleaciones consideradas, por lo cual se espera una mayor dureza para las aleaciones Al-Mg que para las aleaciones Al-Cu y Al-Zn a bajas concentraciones donde se forma solución sólida.

Es interesante analizar el caso de las aleaciones Al-4%Mg que tienen una menor dureza que las aleaciones Al-2%Mg, esto es debido a que de acuerdo al diagrama de fases las aleaciones Al-2%Mg y Al-4%Mg forman dos fases, una es solución sólida rica en Al y la otra es la fase β que corresponde a Al₃Mg₂. La aleación Al-4%Mg forma una mayor fracción de fase β que la aleación Al-2%Mg lo que se corresponde con una disminución en la dureza medida.

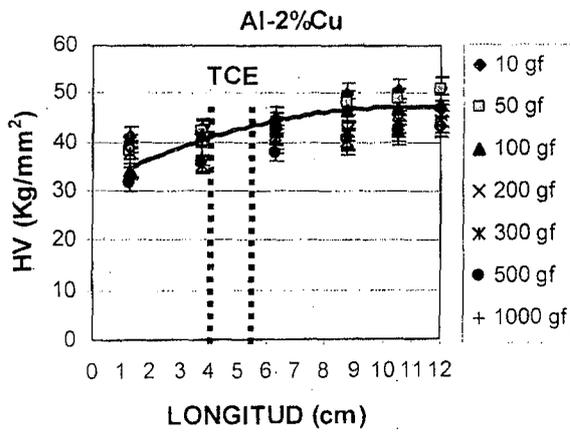
Tabla 1. Diferencia entre los radios atómicos de los elementos aleantes.

Elemento	Radio atómico (nm)	ΔR (nm)
Al	0.143	0
Cu	0.128	+ 0.015
Mg	0.160	- 0.017
Zn	0.133	+ 0.01

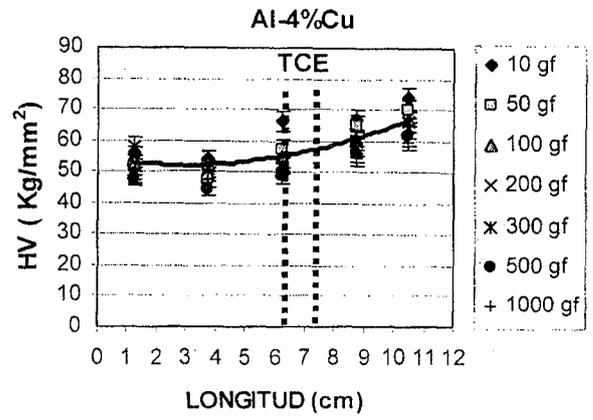
En la figura 4 se observa que para una misma concentración de aleante, la microdureza del Al-2%Mg es mayor que para las aleaciones Al-2%Zn y Al-2%Cu.

La microdureza se incrementa con el incremento de la diferencia de los radios atómicos, como se puede apreciar en la figura 5, donde se comparan elementos que producen esfuerzos de tracción en la red y la relación es aproximadamente lineal con un coeficiente de correlación de 0.94.

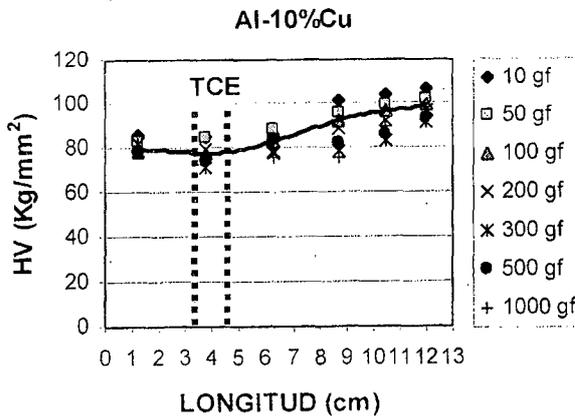
Los valores de microdureza obtenidos en el presente análisis muestran buena concordancia con los valores presentados en la literatura ⁽⁷⁾.



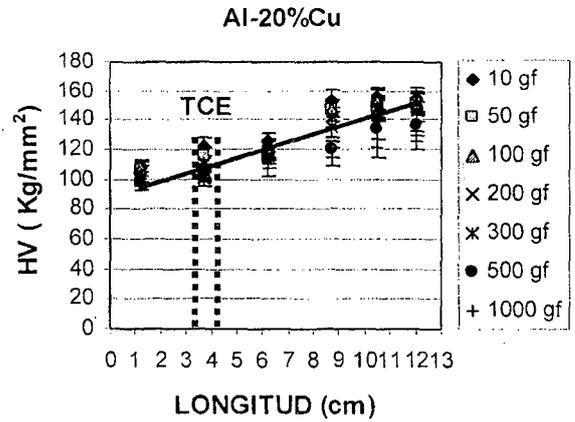
(a)



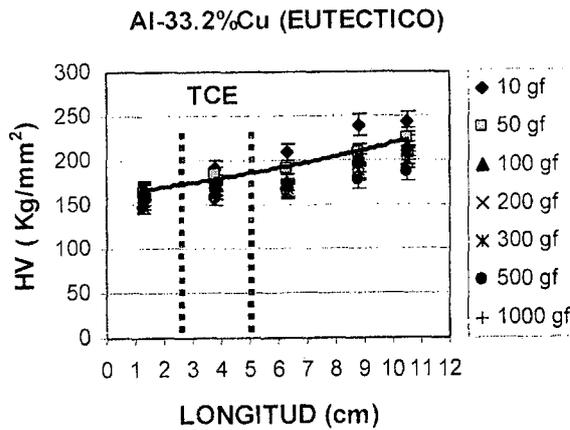
(b)



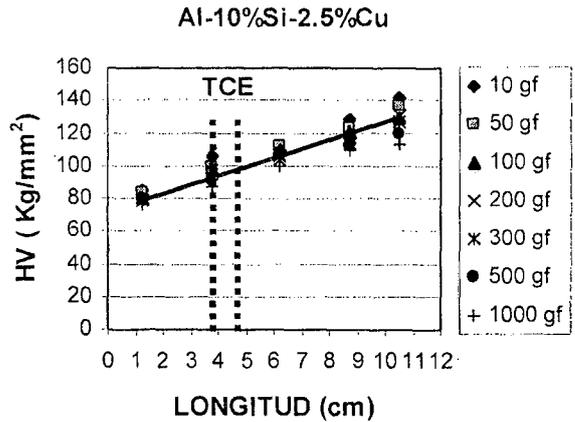
(c)



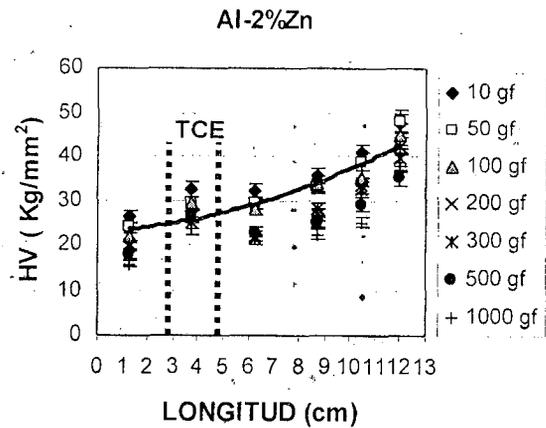
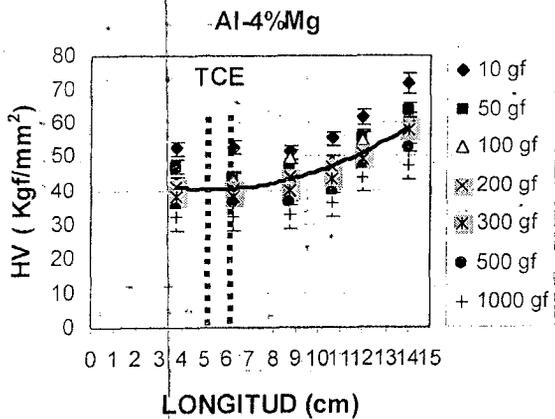
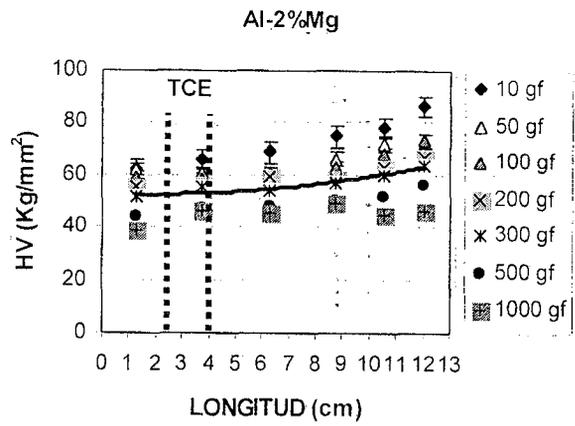
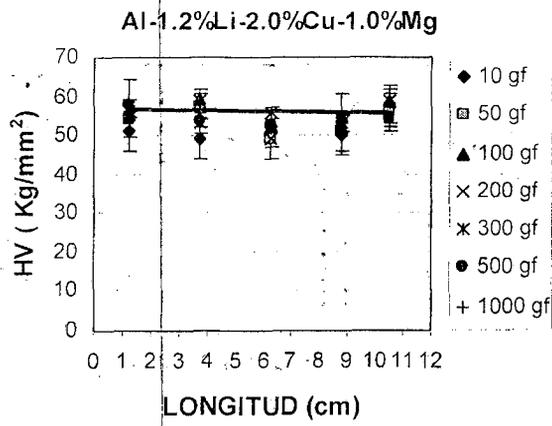
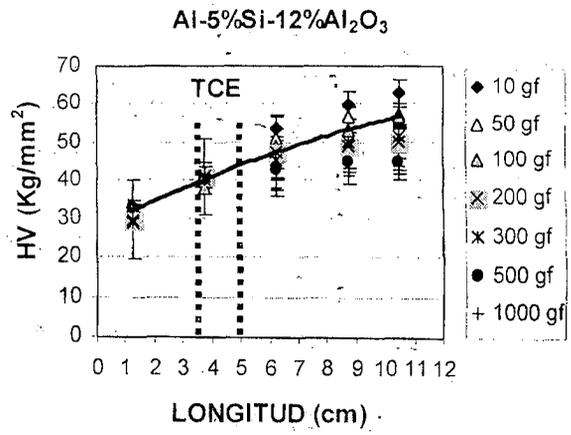
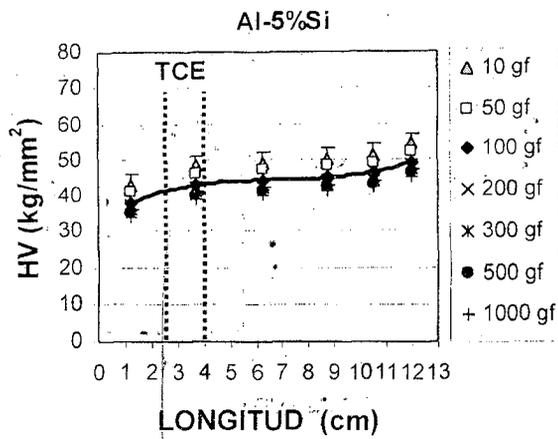
(d)

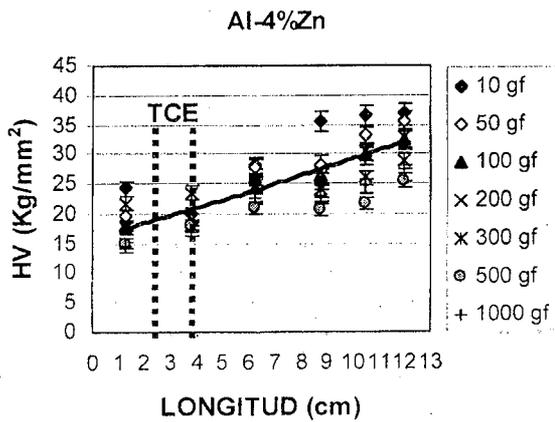


(e)

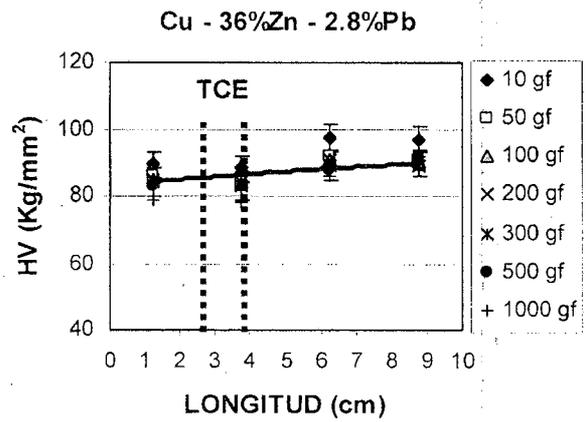


(f)





(m)

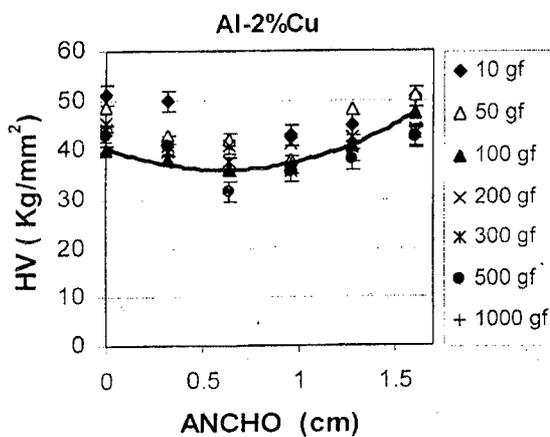


(n)

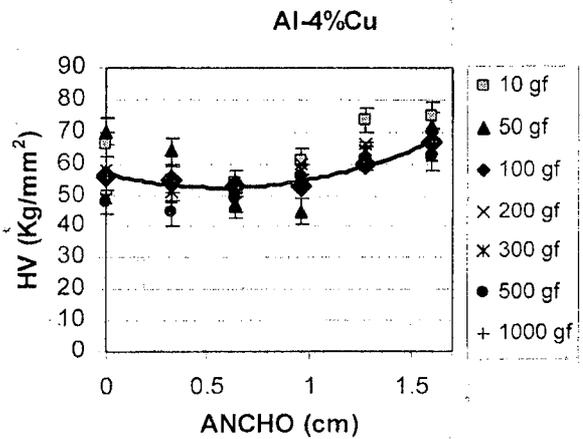
Figura 1. Valores de microdureza en función de la longitud de las probetas empleando diferentes cargas. a)-e) Al-Cu. f-h) Al-Si. i) Al-Li. j)-k) Al-Mg. l)-m) Al-Zn. n) Cu-Zn.

Tabla 2. Valores de microdureza en el estado bruto de fusión utilizando una carga de 100 gf.

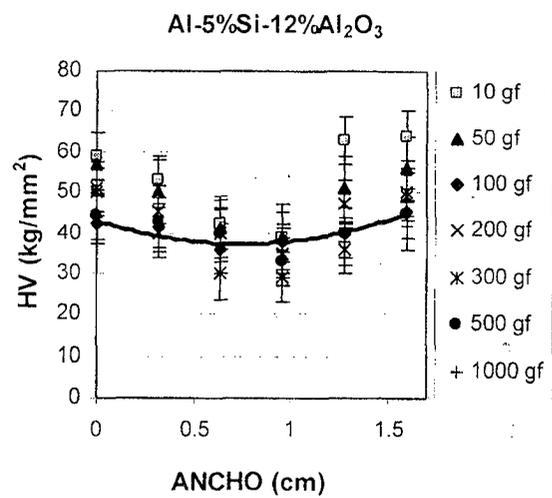
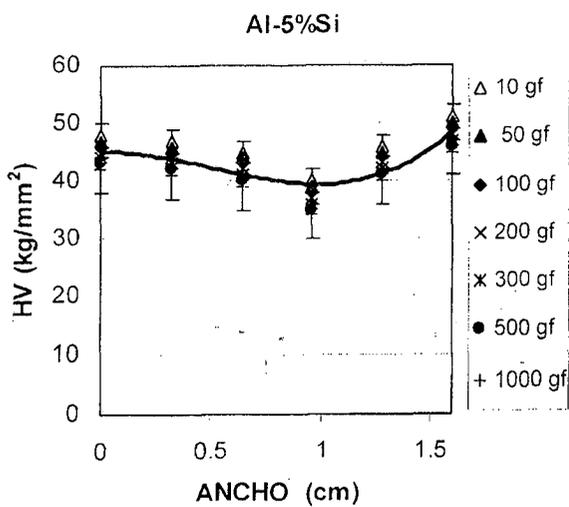
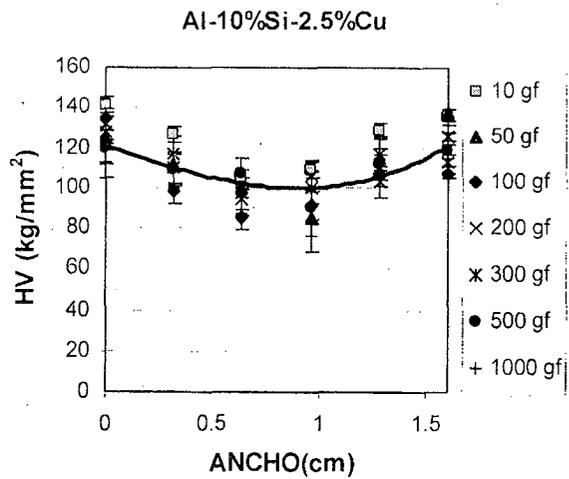
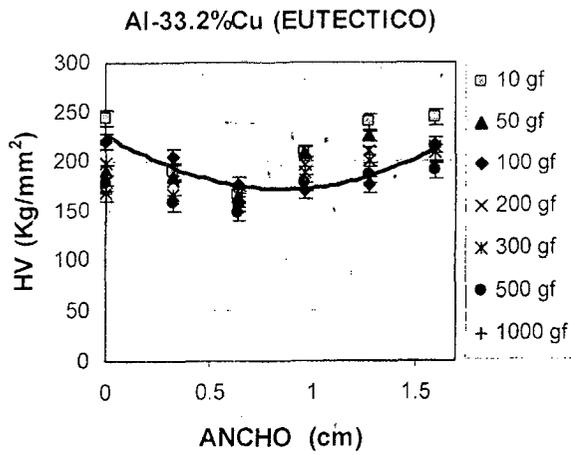
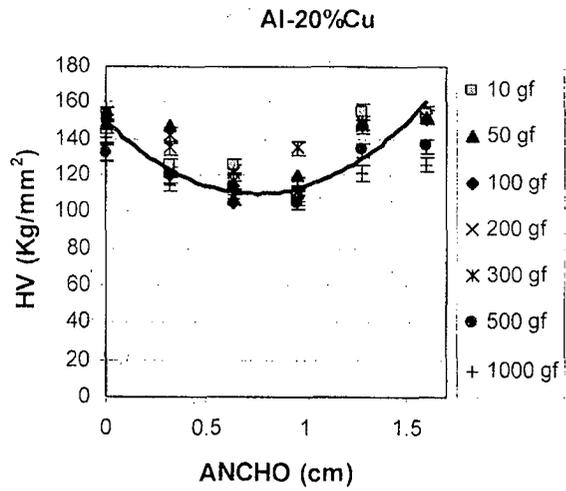
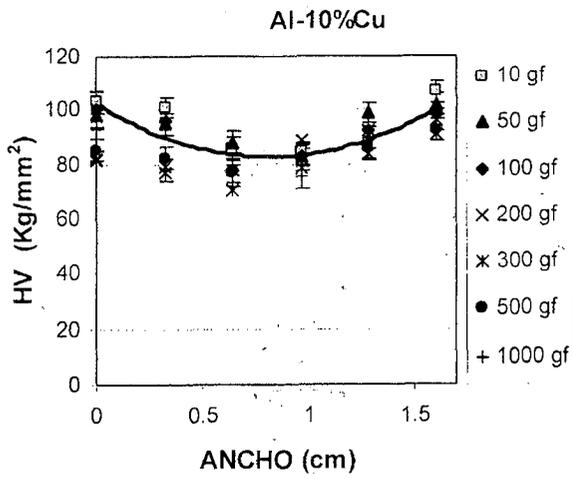
Aleación (% en peso)	Microdureza Vickers (HV: Kg/mm ²)
Al-2%Cu	46.7
Al-4%Cu	60.8
Al-10%Cu	98.6
Al-20%Cu	153
Al-33.2%Cu	204
Al-10%Si-2.5%Cu	120.8
Al-5%Si	46.9
Al-5%Si-12%Al ₂ O ₃	53.1
Al-1.2%Li-2.0%Cu-1.0%Mg	54.6
Al-2%Mg	68.4
Al-4%Mg	55.0
Al-2%Zn	29.7
Al-4%Zn	35.3
Cu - 36%Zn - 2.8%Pb	90.1

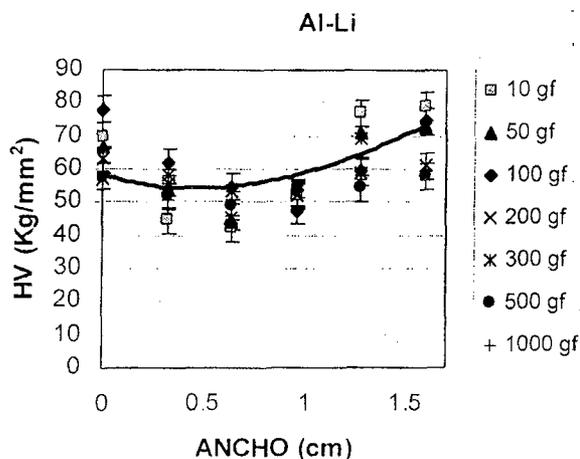


(a)

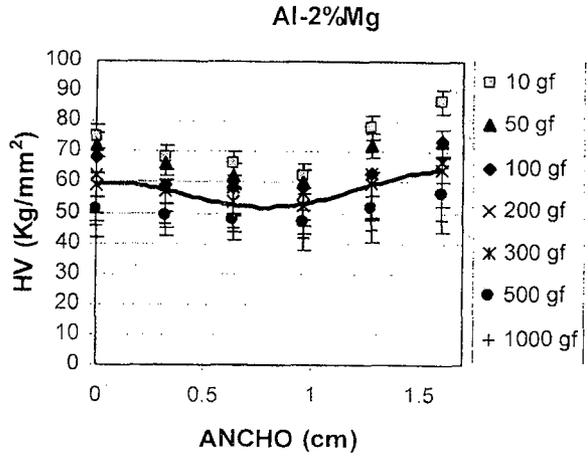


(b)

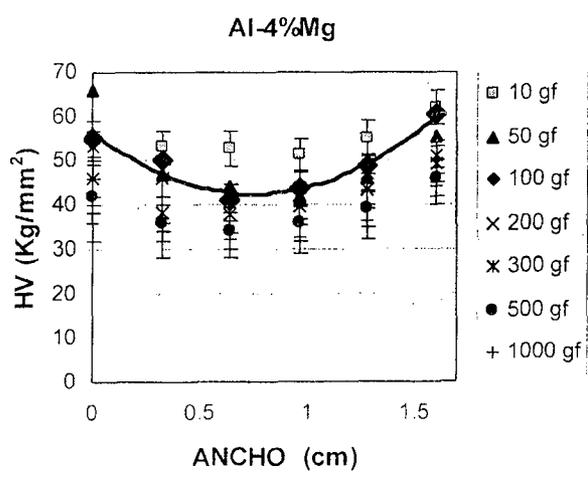




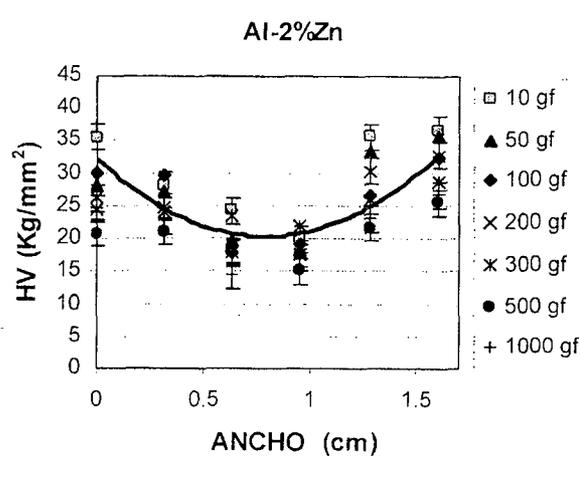
(i)



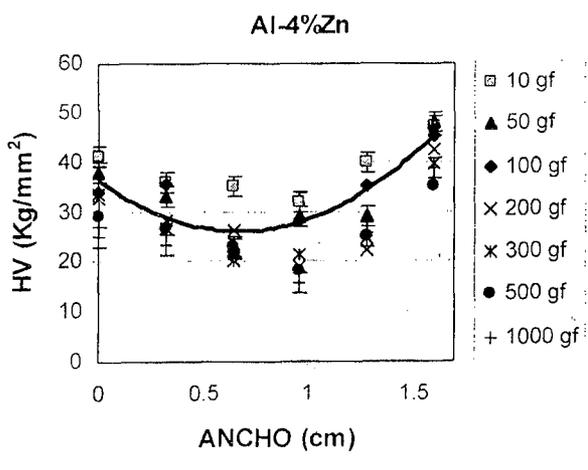
(j)



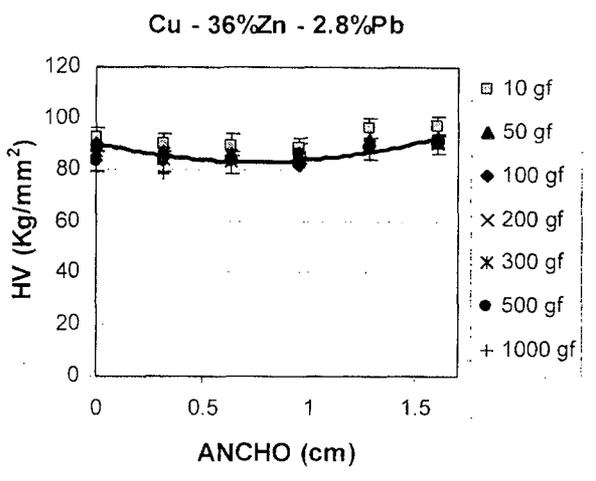
(k)



(l)



(m)



(n)

Figura 2. Valores de microdureza en función del ancho de las probetas empleando diferentes cargas. a)-e) Al-Cu. f-h) Al-Si. i) Al-Li. j)-k) Al-Mg. l)-n) Al-Zn. n) Cu-Zn.

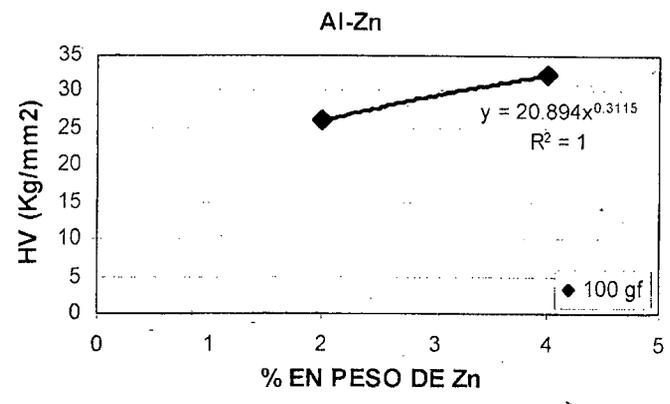
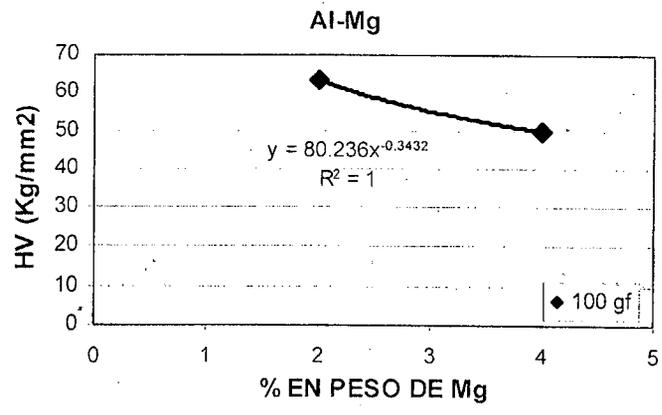
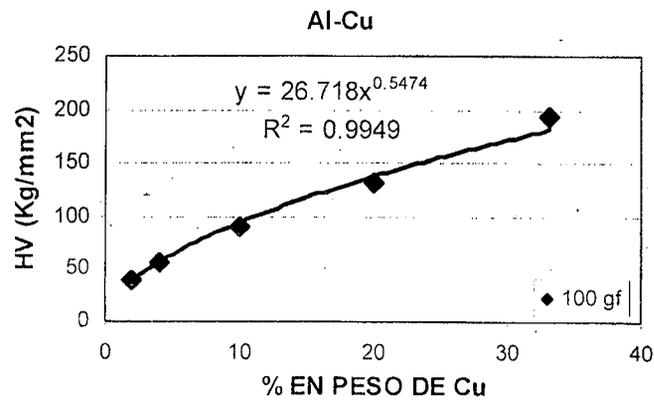


Figura 3. Valores de microdureza en función de la concentración utilizando una carga de 100 gf.
 (a) Al-Cu. (b) Al-Mg. (c) Al-Zn.

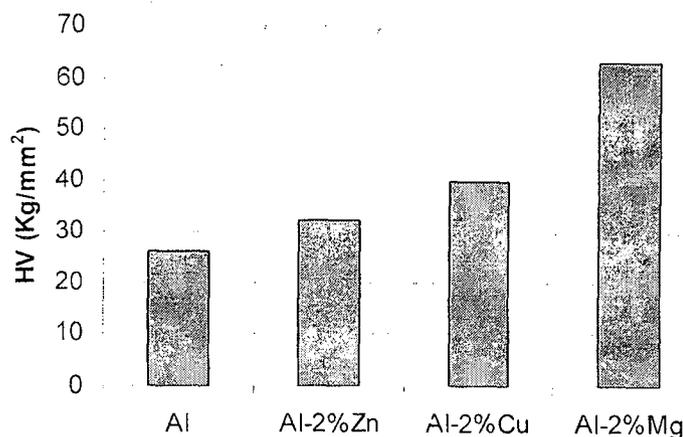


Figura 4. Valores de microdureza para una misma concentración de elemento aleante y utilizando una carga de 100 gf.

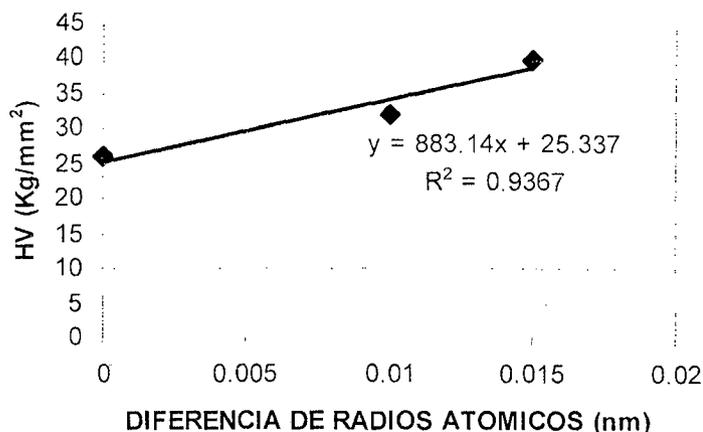


Figura 5. Valores de microdureza en función de la diferencia de radios atómicos utilizando una carga de 100 gf.

IV. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del trabajo son como sigue:

1. La microdureza Vickers es mayor en la zona equiaxial de las probetas que en las zonas columnar y de transición de estructura columnar a equiaxial, TCE.
2. Los valores de microdureza Vickers son mayores en los bordes de las probetas, disminuyendo en la zona central de las mismas.
3. Los valores de microdureza Vickers tienden a disminuir con el aumento de la carga, por lo tanto tienen una tendencia a permanecer constantes con cargas más elevadas (500 – 1000 gf).
4. Las mediciones de microdureza realizadas en las muestras en el estado bruto de fusión dieron valores similares a los obtenidos en las mediciones de las zonas equiaxiales de las probetas.
5. Los valores de microdureza Vickers aumentan con el aumento de la concentración de aleante en

aleaciones Al-Cu y Al-Zn y disminuyen con la concentración de aleante en el caso de las aleaciones Al-Mg.

6. Para una misma concentración de aleante, la microdureza del Al-2%Mg es mayor que para las aleaciones Al-2%Zn y Al-2%Cu.

7. La microdureza se incrementa con el incremento de la diferencia de los radios atómicos.

8. Los valores de microdureza obtenidos en el presente análisis muestran buena concordancia con los valores presentados en la literatura ⁽⁷⁾.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET y a FAPESP por el soporte financiero.

Referencias

- 1- Souza, S.A., Ensaíos Mecânicos de Materiais Matálicos, 3. ed. S.P., Edgard Blücher Ltda., 197 (1974).
- 2- Li, Z., Ghosh, A., Kobayashi, A.S., Bradt, C.R., Indentation fracture Toughness of Sintered Silicon Carbide in the Palmqvist Crack Regime, J. Am. Ceram. Soc., **72**, 6, 904 (1989).
- 3- Ares, A.E.; Rios, T.C., Caram, R., Schvezov, C.E., Solidificación Direccional de Aleaciones Base Aluminio Conteniendo Hasta un 10 % de Cobre. SULMAT 2002. Aceptado (2002).
- 4- Ares, A.E.; Rios, T.C., Caram, R., Schvezov, C.E., Espaciamientos Dendríticos Primarios y Secundarios en Función de Parámetros de Solidificación en Aleaciones Al-2%Cu y Al-4%Cu, Anales AFA. Aceptado (2001).
- 5- Kehl, G., Fundamentos de la Práctica Metalográfica, Editorial Aguilar, Madrid (1963).
- 6- ASTM, Annual Book of American Society for Testing and Materials, E384-89, **2**, 1 (1997).
- 7- ASTM, Metals Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, **2**, Tenth Edition (1990).