

---

# CAMBIOS ESTRUCTURALES DURANTE LA EXTRUSION EN CALIENTE DE UNA ALEACION ZINC-ALUMINIO-COBRE

J.J. NEGRETE, A.A. TORRES (1) y G.J. TORRES-VILLASEÑOR (2)

(1) Univ. Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Metalurgia, Av. Sierra Leona 550, Col. Lomas 2a. Sección, 78210 San Luis Potosí, S.L.P. - México

(2) Univ. Nacional Autónoma de México, Instituto en Investigaciones en Materiales, Apdo. Postal 70-360, 04510 México, D.F. -México

---

## RESUMEN

Se analizan los cambios microestructurales durante la extrusión en caliente de la aleación Zn-21Al-2Cu. La extrusión fue realizada a 260°C usando lingotes con tres tipos de microestructura. La evolución de la microestructura fue observada en los residuos de extrusión mediante microscopía electrónica de barrido. Los resultados muestran que la estructura de colada desaparece parcialmente durante el proceso de homogeneización y desaparece totalmente durante la extrusión. La estructura final de los productos extruados está constituida por dos tipos de granos, formados por la generación de una estructura subgranular, combinada con resbalamiento de las fronteras del grano.

## STRUCTURAL CHANGES DURING HOT EXTRUSION OF A ZINC-ALUMINUM-COPPER ALLOY

### ABSTRACT

Microstructural changes during hot extrusion of the Zn-21Al-2Cu alloy, are analyzed in this article. Extrusion was performed at 260°C using billets with three type of microstructures. Microstructure evolution was observed in the extrusion butts by scanning electron microscopy. Results show that the cast structure partially disappears during the soaking process and totally disappears during extrusion. The final structure of the extruded products is composed by two type of grains, formed by the generation of a subgrain structure, combined with grain boundary sliding.

*Keywords: microstructure, Zn-Al alloys, extrusion, phase transformations, mechanical working*

## INTRODUCCION

La aleación Zn-21Al-2Cu posee propiedades muy atractivas que permiten su aplicación comercial en diversos campos. La aleación puede ser sometida al proceso de extrusión exitosamente aunque para obtener productos sanos y dimensionalmente aceptables se requiere un cuidadoso control de la microestructura (Negrete et al., 1990). La aleación está basada en la composición eutéctica (Zn-22%Al) del diagrama Zn-Al modificada con la adición de 2% en peso de Cu. La cantidad de cobre que se añade no modifica la microestructura del sistema excepto por la formación de muy pequeñas cantidades de fases  $\epsilon$  y  $\tau'$  que son ricas en cobre. El comportamiento mecánico si es notablemente mejorado sobre todo la resistencia a la fluencia lenta, la resistencia a la tensión y la ductilidad. La estructura de la aleación está determinada por las condiciones en que se presenta la reacción eutéctica  $\beta \rightarrow \alpha + \eta$  mostrada en el diagrama de la figura 1 y que ocurre a los 275°C. Si la reacción se lleva a cabo bajo condiciones de enfriamiento rápido se produce una matriz de granos finos de las fases  $\alpha + \eta$ , dando lugar a una estructura granular. Si las condiciones de enfriamiento son más lentas la matriz producida está formada por las mismas fases  $\alpha + \eta$  pero distribuidas en forma de laminillas formando una estructura semejante a la perlita tradicional de los aceros al carbono.

La estructura de colada de la aleación se caracteriza por la presencia de una fase  $\alpha$  primaria, que corresponde al primer sólido formado durante el enfriamiento de la aleación desde el estado líquido, esta fase  $\alpha$  primaria está rodeada de una matriz granular o laminar dependiendo de la velocidad de enfriamiento durante la solidificación y finalmente un constituyente interdendrítico de características eutécticas formado al solidificar el líquido remanente. La destrucción de la estructura de colada es un proceso que requiere de tiempos muy largos aun a temperaturas por encima de la eutéctica, esto se debe a que la matriz de la estructura de colada tiene una composición cercana a la de equilibrio y se encuentra separando físicamente la fase  $\alpha$  primaria del constituyente interdendrítico, los cuales deberían reaccionar entre sí para homogeneizar la composición química. El proceso de homogeneización puede ser acelerado por medio de la deformación plástica, puesto que se imparte movilidad a los constituyentes logrando ponerlos en contacto facilitando de esta manera la reacción. Con el propósito de establecer el papel de la microestructura así como su evolución durante el proceso de extrusión de la aleación, se llevaron a cabo pruebas de extrusión utilizando material con las 3 variedades de microestructura.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se obtuvieron por medio de colada semi-continua barras de la aleación de las cuales se cortaron tochos o billets para extrusión de 40 mm. diámetro y 100 mm. de largo. Posteriormente los tochos fueron tratados térmicamente para obtener en ellos las estructuras granular y laminar. El tratamiento térmico consistió en mantener los lingotes

del material a una temperatura de 350°C durante 5 horas y luego fueron enfriados violentamente en agua y moderadamente en el aire. La extrusión de los tochos con estructura de colada continua, estructura laminar y estructura granular, se llevo a cabo a una temperatura de 260°C para obtener un perfil de sección redonda de 10 mm. de diámetro, la temperatura utilizada es menor que la temperatura de transformación eutéctica. La extrusión se realizó en el modo indirecto utilizando dados con entrada de ángulo recto, la relación de extrusión fue de 16:1. La velocidad de deformación mantenida durante la extrusión del tocho fue de  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Los residuos de extrusión de cada prueba con diferente microestructura se seccionaron longitudinalmente y fueron pulidos metalográficamente para observar al microscopio electrónico de barrido los cambios de la microestructura a medida que el material avanza desde la zona no deformada hasta el orificio del dado de extrusión.

## RESULTADOS Y DISCUSION

En la figura 2, se presenta la estructura de colada continua presente en el tocho antes de extruirlo mientras que en las figuras 3, 4 y 5 se observa la evolución de la microestructura de colada a través de 3 zonas en el residuo de extrusión; la primera de ellas corresponde a la zona no deformada, es decir la base del tocho y se encuentra en la figura 3; la segunda corresponde a la zona intermedia donde la deformación es aun ligera y se encuentra en la figura 4, finalmente, la tercera corresponde a la zona de máxima deformación muy cerca del orificio del dado y se muestra en la figura 5.

La estructura de colada (Ver figura 2), está constituida por fase  $\alpha$  primaria (partículas oscuras) que corresponde al primer sólido formado durante el enfriamiento de la aleación desde el estado líquido, esta fase  $\alpha$  primaria está rodeada de una matriz laminar fina ya que la velocidad de enfriamiento durante la solidificación si bien es alta no es tan violenta como para formar granos finos de  $\alpha + \eta$ . Finalmente, se observa la presencia de un constituyente interdendrítico (partículas claras) de ca-

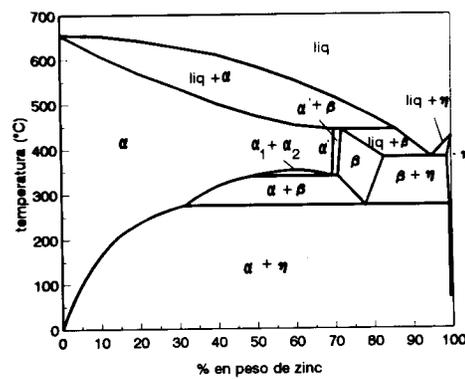


Fig. 1: Diagrama de equilibrio del sistema Zn-Al

racterísticas eutécticas formado al solidificar el líquido remanente. Cabe destacar que la fase  $\alpha$  primaria es una solución sólida de aluminio con gran cantidad de zinc y que al bajar la temperatura del sistema esta fase queda sobresaturada presentándose la precipitación del exceso de soluto de dos maneras; continua y discontinua. En este caso la precipitación del exceso de soluto durante el enfriamiento de la aleación desde la temperatura de solidificación, ocurre de manera discontinua, dando lugar a una estructura semilaminar que es apenas perceptible en las partículas de la fase  $\alpha$  primaria observadas en la figura 2.

En la figura 3 que corresponde a la zona del residuo de extrusión que casi no ha sufrido deformación plástica dentro de la recámara, básicamente lo que se observa es

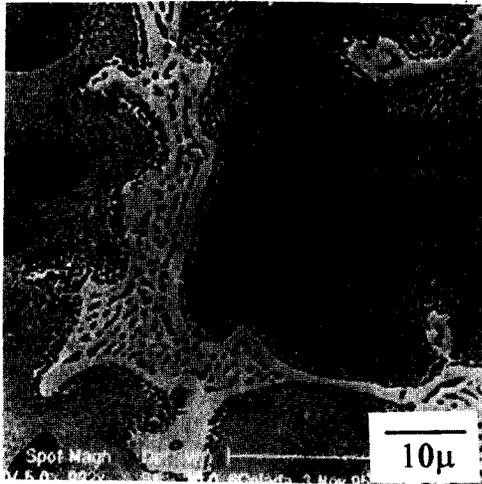


Fig. 2: Microestructura del material obtenido por colada semi-continua

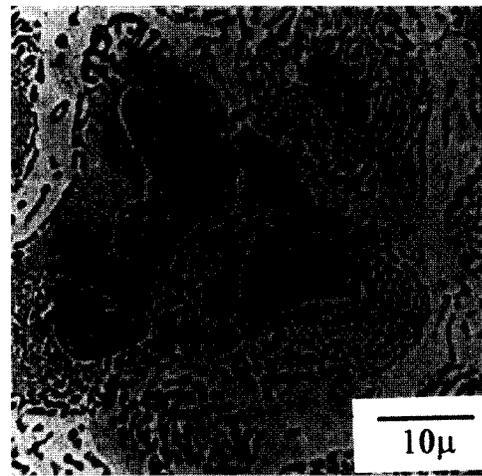


Fig. 3: Microestructura de colada semi-continua observada en la base del residuo de extrusión

un engrosamiento de la estructura de la matriz laminar como efecto del calentamiento que sufre la aleación durante la extrusión en caliente. En las figuras 4 y 5 que corresponden a las zonas de mayor deformación, se observa que el constituyente interdendrítico formado principalmente por Zinc, experimenta mayor deformación que las colonias de la matriz laminar y que las partículas de  $\alpha$  primaria. A medida que el material avanza hacia el orificio de salida del dado, experimenta la máxima deformación plástica durante el proceso de extrusión, ocurre entonces una fragmentación o disgregado de las colonias laminares así como de las partículas de  $\alpha$  primaria, conduciendo esto a una estructura de tipo granular de fases  $\alpha + \eta$  muy semejante a la reportada por diversos autores como la estructura que presenta propiedades superplásticas en el caso de aleaciones Zn-

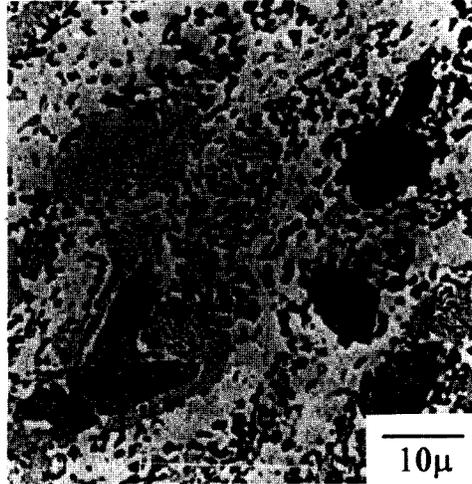


Fig. 4: Microestructura de colada semi-continua observada en la parte media del residuo de extrusión

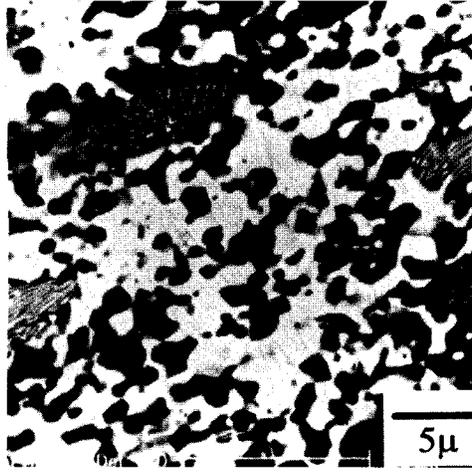


Fig. 5: Microestructura de colada semi-continua observada en la zona del residuo de extrusión

Al de composición eutéctica (Zn-22Al) (Mohamed et al., 1977, Langdon, 1994). Cabe mencionar que el cobre presente en la aleación, se encuentra parte disuelto en las fases  $\alpha$  y  $\eta$ , y parte formando pequeños precipitados de fases  $\epsilon$  y  $\tau'$  que son difíciles de observar en el microscopio electrónico de barrido, pero que sin embargo, su presencia es confirmada por análisis de difracción de rayos X así como por medio de mapeo de rayos X en el microscopio electrónico.

El mecanismo mediante el cual se destruye la estructura de colada involucra la generación inicial de una estructura de subgranos dentro de las partículas del constituyente interdendrítico, el cual está en su mayor parte formado por la fase  $\eta$ , y una fragmentación tanto de la estructura de subgranos como de la fase  $\alpha$  primaria y el constituyente laminar seguida de resbalamiento de las fronteras de grano.

En la figura 6 se presenta la estructura laminar obtenida al enfriar lentamente el lingote antes de extruirlo y en las figuras 7, 8 y 9 se presenta la evolución de esta microestructura en las 3 zonas del residuo de extrusión ya descritas anteriormente. Puede observarse que la estructura laminar obtenida en la aleación al enfriarla lentamente, está formada por partículas de  $\alpha$  primaria, matriz laminar de fases  $\alpha+\eta$  y por partículas del constituyente interdendrítico, tanto las partículas de fase  $\alpha$  primaria como las de interdendrítico se encuentran presentes debido a que el tiempo de homogeneización fue insuficiente como para que fueran consumidas por la matriz. Esto se debe a que la matriz tiene la composición de equilibrio y separa físicamente los constituyentes que deben de reaccionar para homogeneizar la estructura. Las partículas de  $\alpha$  primaria muestran en su interior una precipitación continua del exceso de soluto debido a que durante el enfriamiento lento se tiene mayor facilidad para que ocurra la difusión a través de la red, que

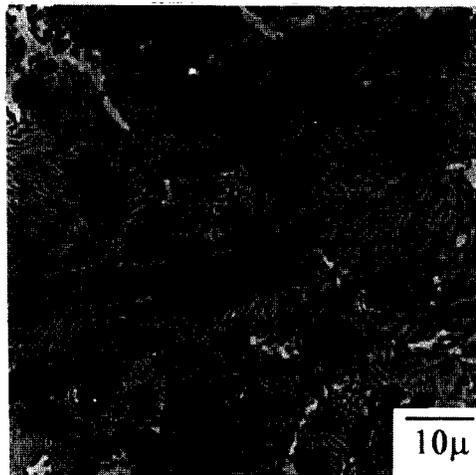


Fig. 6: Microestructura del material obtenido por colada semi-continua y tratado térmicamente para obtener la estructura laminar. Antes de extruir.

es el mecanismo principal que actúa durante dicho evento.

En la figura 7, que representa la estructura del residuo de extrusión en la parte más alejada del orificio del dado, se observa que la estructura solo sufre un ligero engrosamiento de las laminillas, como efecto del calentamiento del material durante el proceso de extrusión. Por otro lado las figuras 8 y 9 que representan zonas del residuo de extrusión con deformación creciente, muestran que tanto la matriz laminar como el constituyente interdendrítico se fragmentan dando lugar a una estructura de tipo granular semejante a la obtenida al extruir la estructura de colada.

En la figura 10 se presenta la estructura granular obtenida

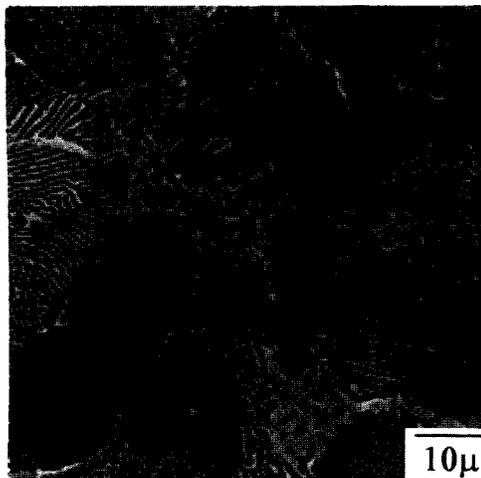


Fig. 7: Microestructura laminar observada en la base del residuo de extrusión.

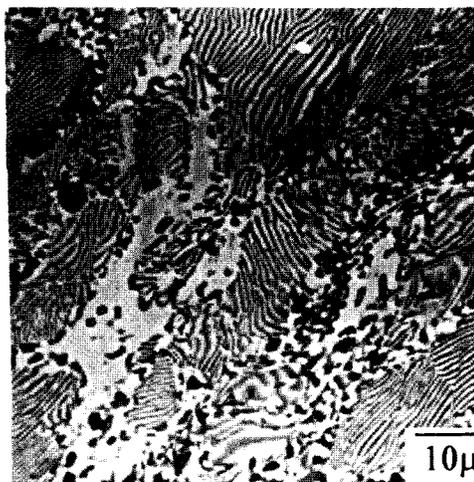


Fig. 8: Microestructura laminar observada en la parte media del residuo de extrusión.

nida al enfriar violentamente el lingote antes de extruirlo y en las figuras 11, 12 y 13 se encuentra la evolución de esta microestructura en las tres zonas ya referidas del residuo de extrusión.

La microestructura de la figura 10 muestra que el tiempo de homogeneización fue insuficiente de tal forma que tanto la fase  $\alpha$  primaria como el constituyente interdendrítico no desaparecieron. Al enfriar violentamente el material desde la temperatura de homogeneización, se produjo únicamente la conversión de la matriz de composición eutécticoide a un producto granular de fases  $\alpha + \eta$ . La fase  $\alpha$  primaria aparece ahora con el exceso de soluto precipitado de manera discontinua formando laminillas de  $\alpha + \eta$  en lugar de precipitados de  $\eta$  en  $\alpha$ .

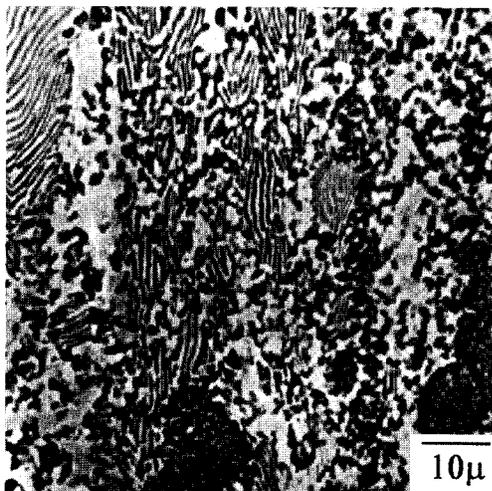


Fig. 9: Microestructura laminar observada en la zona del residuo de extrusión.

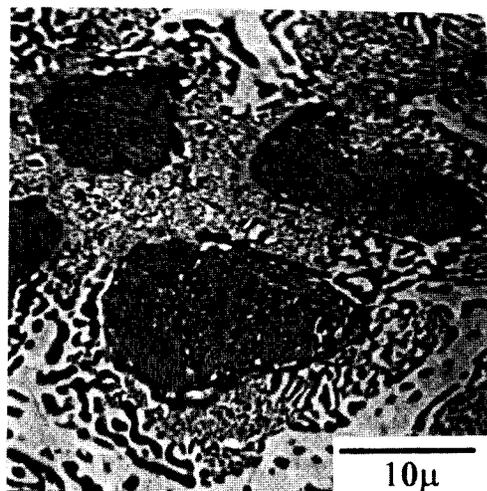


Fig. 10: Microestructura del material obtenido por colada semi-continua y tratado térmicamente para obtener la estructura granular. Antes de extruir

de manera continua como es el caso de las otras dos microestructuras estudiadas.

La figura 11 que representa la microestructura granular resultante en la base del residuo de extrusión, es decir una zona de mínima deformación plástica, muestra que las partículas de fase  $\alpha$  primaria tienden a combinarse con el constituyente interdendrítico. Por otro lado la matriz granular solo experimenta un ligero crecimiento en el tamaño de los granos.

En las figuras 12 y 13, que representan la misma estructura granular del residuo de extrusión pero en zonas de deformación plástica creciente, puede observarse que los constituyentes de la microestructura evolucionan ha-

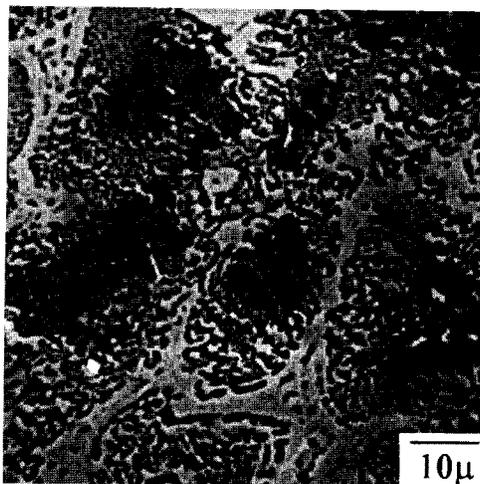


Fig. 11: Microestructura granular observada en la base del residuo de extrusión

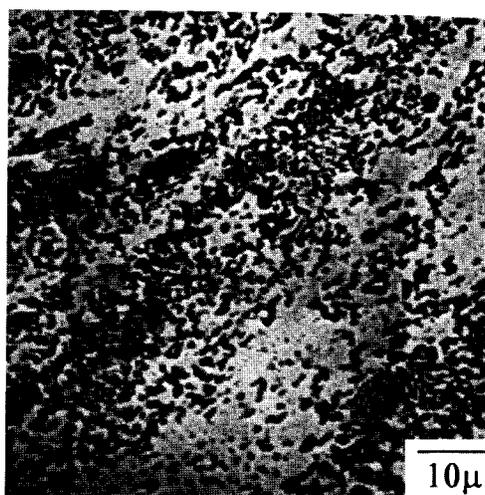


Fig. 12: Microestructura granular observada en la parte media del residuo de extrusión

cia una configuración granular semejante a la que exhibe propiedades superplásticas en este tipo de aleaciones.

Aunque el tiempo de homogeneización no fue suficiente para destruir totalmente la estructura de colada y poder tener de esta manera estructuras totalmente laminares o granulares, puede afirmarse que independientemente de la microestructura inicial, la estructura del producto extruido a temperaturas por debajo de la temperatura de transformación eutectoide, será en gran medida granular y semejante a la que exhibe propiedades superplásticas. Esta estructura se obtiene por la formación de una estructura de subgranos en la fase  $\eta$  que inclusive puede ser que ya se encuentre formada, pero que no es evidente ya que la muestra no es atacada con ningún reactivo antes de observarla en el microscopio electrónico de barrido. Asimismo la estructura laminar presente se fragmenta luego de una deformación considerable dando lugar a una estructura granular de fases  $\alpha+\eta$ . Por otro lado la estructura granular se deforma por el mecanismo clásico de deformación superplástica que es el resbalamiento de las fronteras de granos (Langdon, 1994).

### CONCLUSIONES

La destrucción de la estructura de colada de la aleación es difícil de alcanzar mediante el tratamiento térmico. Requiere que adicionalmente se imparta una deformación plástica severa.

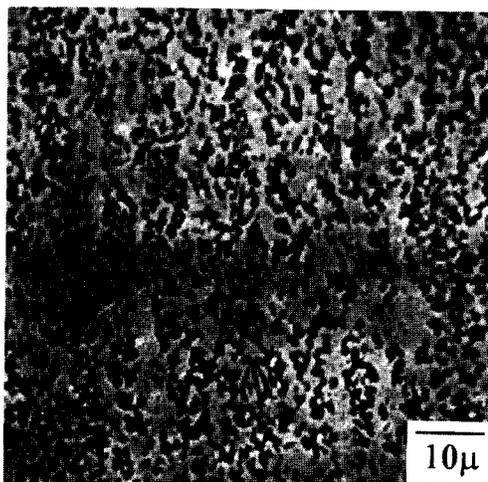


Fig. 13: Microestructura granular observada en la zona del residuo de extrusión

La destrucción de la estructura de colada se facilita con la deformación plástica ya que el flujo logra poner en contacto los constituyentes que deben reaccionar para homogeneizar la composición química del sistema

Un mayor grado de deformación plástica promueve el proceso de destrucción de la estructura de colada.

La destrucción de la estructura de colada mediante la deformación plástica impartida durante el proceso de extrusión produce la generación de una estructura granular similar a la que exhibe características superplásticas

La presencia de la estructura de colada en el lingote de extrusión ocasiona defectos en los productos extruidos, sobretodo distorsiones en los perfiles, las cuales son provocadas porque los diversos constituyentes de la estructura poseen diferente resistencia mecánica y por lo tanto fluyen heterogéneamente. Un defecto adicional es el bandeado de la estructura ya que si el grado de deformación es pequeño, los constituyentes remanentes de la estructura de colada no alcanzan a ser destruidos y al ser deformados durante la extrusión se alinean en la dirección del flujo plástico.

Es importante complementar este estudio realizando una homogeneización mucho mas prolongada del lingote de colada continua antes de extruirlo, con el objeto de partir de una estructura con el menor vestigio de estructura de colada.

### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevo a cabo con apoyos del CONACYT No. de Convenio 1208P-A, Fondo de Apoyo a la Investigación No. de Convenio C96-2-7.17, FOMES y dentro del convenio de intercambio académico UNAM-UASLP.

### REFERENCIAS

Langdon T. G., *Materials Science and Engineering*, A174, Elsevier Sequoia. (1994) 225-230.

Mohamed F. A., Ahmed M. M. y Langdon T. G., *Metallurgical Transactions A*, V8A (1977) 933-938.

Negrete J., G. Torres y L. Valdés., Proceso de Extrusión de Perfiles a partir de Aleaciones Zn-Al-Cu. Patente Solicitada por la U.N.A.M. En la Oficina de Patentes en México. Otorgada en 1990 con Registro No. 161483.