

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

"REFINAMIENTO DE GRANO DE ZINALCO MEDIANTE
EXTRUSIÓN EN CANAL ANGULAR CONSTANTE"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIA
E INGENIERÍA DE MATERIALES

P R E S E N T A :

Q MARCO POLO GARCÍA MONTES

Tutor: Dr. Gabriel Torres Villaseñor





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS ACADEMICOS

Al Dr. Gabriel Torres Villaseñor, por la confianza.

A todos mis maestros de maestría:

- Dr. Alejandro García Hinojosa
- Dr. Jorge Montemayor A.
- Dr. Seguei Fomine
- Dr. Gonzalo Gonzáles R.
- Dr. Guillermo Pulos
- Dr. J. Hernández C.
- Dr. Reyes Gasga

Al Instituto de Investigaciones en Materiales

Por el apoyo técnico

Dr. J. Guzmán

Dr. Said R. Casolco

Dra. Leticia Baños

Ernesto Sánchez Colín

E. Caballero Rodríguez

Ares Gómez G.

Al personal del taller del Instituto

Por el apoyo económico

CONACYT [Beca de Maestría y Ayudante SNI III]

Proyecto PAPIIT (IN106605-2)

Y a nuestra gloriosa Universidad Nacional Autónoma de México

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mis padres; José Guadalupe y Fabi.

Por su amor y apoyo infinitos.

A mi tío José cruz

A mis hermanas Lupita y Liz.

A Lily.

A los grandes amigos:

Oscar C., Esaú, Delia, Rosario, Oscar S., Juan, Oscar O., Ares

INDICE GENERAL

	Página
Resumen	i
Objetivos	ii
Introducción	1
Capítulo I Antecedentes Generales	5
1.1 ECAC	5
1.1.1 Deformación por deslizamiento puro	5
1.1.2 Características óptimas del proceso	8
1.1.3 Aplicaciones	13
Capítulo II Sustento Teórico	15
2.1 ECAC	15
2.1.1 Significado del ángulo Φ	19
2.1.2 Pasos múltiples de extrusión	20
2.1.3 Efecto de la rotación de la muestra entre extrusiones repetitivas	21
Capítulo III Desarrollo Experimental	27
3.1 Planos del sistema ECAC	28
3.2 Proceso ECAC	34
3.3 Análisis de las muestras procesadas mediante ECAC	39
Capítulo IV Resultados; análisis y discusión	40
4.1 Resultados; análisis y discusión	40
Conclusiones	63
Bibliografía	64

RESUMEN

En el presente trabajo se rediseñó un dado de extrusión en canal angular constante, con el objetivo de evaluar la influencia de la deformación plástica severa sobre la aleación zinalco. La característica más importante que aporta la cámara al material procesado está relacionada con la modificación significativa de la microestructura, así como una reducción en el tamaño de grano en aleaciones base zinc. Los resultados obtenidos después de un solo paso de extrusión a 240 °C indican que la microestructura resultante está constituida por una mezcla de grano fino mayoritariamente y regiones de fases ($\alpha+\eta$). Mientras que cuando la extrusión de la muestra se lleva a cabo a 300 °C, procesada en múltiples ocasiones y siguiendo rutas de extrusión específicas, los resultados son evidencia de que la estructura dendrítica de la aleación obtenida por solidificación es modificada hasta la obtención de grano fino, condición necesaria para que un material presente características superplásticas.

Para caracterizar la microestructura del material antes y después de la deformación mediante el proceso de extrusión en canal angular constante, se utilizaron técnicas de microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos equis, así como pruebas de dureza.

ABSTRACT

In this work, a Zn-Al-Cu alloy was extruded in a modified system of equal channel angular extrusion, (ECAE) at 240° and 300° C. After the alloy was processed, a significant reduction on the grain size was obtained. Metallographic análisis showed that the microstructure defined by a mixture of small grains and regions with ($\alpha + \eta$) phases, characteristics needed to have superplastics properties. The process ECAE performed has shown that is an alternative to other methods of grain size reduction as rolling process.

OBJETIVO GENERAL

- Modificar la microestructura de la aleación zinalco® por medio de extrusión en canal angular constante.

OBJETIVOS PARTICULARES

- i) Implementación del arreglo experimental mediante el diseño y fabricación de un dado de extrusión en canal angular constante.
- ii) Procesar la aleación Zn - 22%Al – 2% Cu a través del dado de extrusión con canal angular constante con el propósito de obtener una reducción significativa en el tamaño de grano de dicha aleación mediante deformación plástica severa.

INTRODUCCIÓN

La superplasticidad ocurre en un intervalo limitado de velocidades de deformación, típicamente en la vecindad de 10^{-3} seg^{-1} , en materiales que tienen tamaños de grano por debajo de $10\mu\text{m}$, sin embargo existen evidencias experimentales que indican que el comportamiento superplástico es desplazado a mayores velocidades de deformación cuando el tamaño de grano se disminuye y esto ha generado un considerable interés en el desarrollo de procedimientos para el refinamiento de grano en metales. ^[1]

Procesos termomecánicos son generalmente limitados para producir materiales con tamaños de grano menores a $1 \mu\text{m}$ pero han sido desarrolladas técnicas en las cuales el tamaño de grano puede ser reducido a valores frecuentemente menores a $1 \mu\text{m}$ usando procedimientos que generan una alta densidad de dislocaciones a través de la deformación plástica severa. ^[1]

Actualmente, hay un considerable interés por la fabricación de materiales metálicos con tamaños de grano ultra finos, ($100 \text{ nm} - 1000 \text{ nm}$)^[2]. Sin embargo, muchos de los procesos de uso común, así como la solidificación rápida y la condensación con gas inerte, son apropiados sólo para la fabricación de cantidades muy pequeñas de material.

Algunos métodos están ahora disponibles para la obtención de granos de tamaño ultra fino en cantidades de material relativamente grandes y esos procesos están basados en la deformación plástica severa. Es posible clasificar esos procedimientos y dividirlos en dos grupos:

- Procesos de deformación repetitiva como la extrusión convencional.
- Y procesos de deformación unidireccional como la torsión a alta presión y la extrusión en canal angular constante, (ECAC).

Experimentos sugieren que la torsión a alta presión (figura 1), puede ser más efectiva que ECAC en el refinamiento de grano de un material con tamaños por debajo de 100 nm , no

obstante, ECAC es especialmente atractiva porque tiene potencial para llevarse a escalas de producción relativamente grandes. [3]

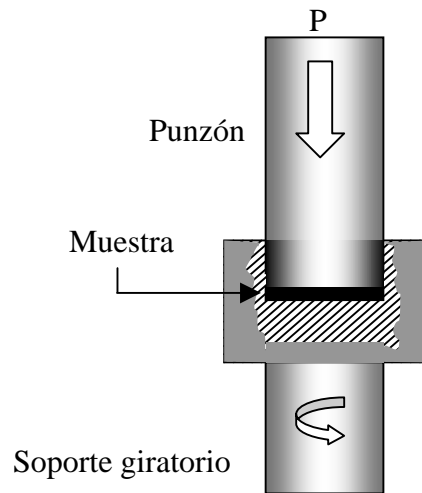


Figura I. Principio de torsión a alta presión.

Existen numerosos métodos para someter muestras metálicas a la imposición de deformaciones, incluidos los procesos industriales de trabajado metálico como el laminado, la forja y la extrusión, pero todos esos métodos necesitan un cambio en las dimensiones físicas de la muestra. En contraste, la extrusión en canal angular constante, (ECAC), difiere de esos procesos convencionales porque la dimensión del área transversal de la muestra permanece sin cambios durante la deformación. Históricamente, ECAC fue desarrollado por primera vez en la Unión Soviética hace unos 25 años pero el proceso ha tenido un especial interés en los países occidentales desde sólo unos 11 años atrás. [4]

El proceso de extrusión en canal angular constante (ECAC), es un procedimiento de deformación plástica severa de materiales que consiste en procesar una probeta con un pistón a través de una cámara de extrusión que contiene dos canales que intersecan en un ángulo dado (Φ). De este modo, cuando el material atraviesa la intersección de ambos canales, experimenta una deformación cortante pura, uniforme y localizada en el centro de la probeta, que origina importantes cambios en la microestructura del material de partida y por lo tanto, en sus propiedades mecánicas. La probeta se mueve entre los canales como un cuerpo rígido, de modo que la deformación ocurre de manera uniforme,

excepto en las regiones inicial y final. De ahí que para pruebas mecánicas, se tienda a desechar estas zonas por la heterogeneidad de la deformación.

Como resultado del proceso, la muestra sometida a deslizamiento puro mantiene la misma área de sección transversal y puede ser procesada en múltiples ocasiones. Los experimentos muestran que es posible realizar cambios significativos a las propiedades material.

Por otra parte, para la realización de este trabajo, se utilizó la aleación eutectoide Zn – Al, modificada con cobre, Zn–22% Al–2% Cu, (zinalco®). Sus principales propiedades físicas aparecen en la tabla I.

Temperatura de fusión	694 a 754°K
Densidad	$5.4 \times 10^{-3} \text{ kgm}^{-3}$
Módulo elástico	100 GPa
Conductividad eléctrica	$0.0000059 \text{ ohm cm}^{-1}$
Conductividad térmica	$125.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Coefficiente de expansión térmica (entre 290 y 548°K) ...	$25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Tabla I Propiedades físicas del zinalco®

El zinalco® tiene una microestructura compuesta de dos fases, la fase α , es aluminio con menos del 1% de zinc disuelto y la fase β , es zinc con menos del 0.5 % de aluminio disuelto y en ambas fases hay una cierta cantidad de cobre, también en solución. Las fases en su microestructura dependen de la trayectoria seguida durante el enfriamiento.

En la figura II, aparece el diagrama de fases para aleaciones Zn –Al; la línea punteada corresponde al 76% en peso de zinc.

En el presente trabajo, se realizaron pruebas de extrusión en canal angular constante a 300°C y a 240°C. Los enfriamientos respectivos que experimenta la aleación son de 300°C a 20°C y de 240°C a 20°C al salir del dado de extrusión.

La aleación binaria Zn – Al con composición eutectoide es superplástica a temperaturas por arriba de 200° C y frágil a temperatura ambiente. Sin embargo, al ser modificada con cobre, se observa un incremento en la ductilidad a temperatura ambiente (de 10 a 180%).

Las cantidades de cobre para dar este efecto se encuentran dentro de la región de solubilidad sólida (menores a 2.5%) y prácticamente no afectan las temperaturas de transición mostradas en el diagrama binario Zn – Al de la figura II.

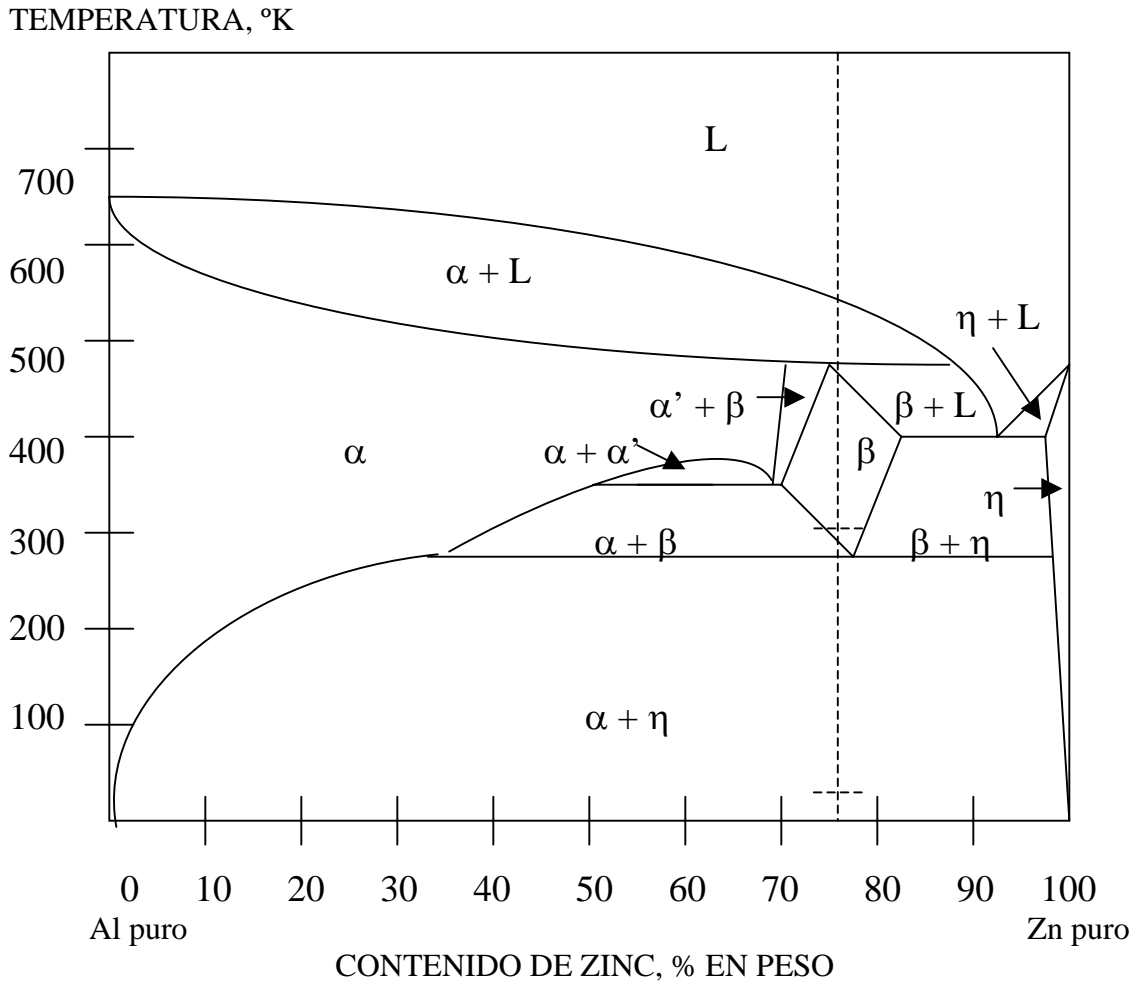


Figura II. Diagrama de fases para aleaciones Zn -Al

Para finalizar la introducción y de acuerdo con los objetivos planteados, en éste trabajo, se presentan los principios de la extrusión en canal angular constante y los resultados de haber sometido al zinalco® a deformaciones plásticas mediante ésta técnica teniendo dos diferentes temperaturas como variable experimental.

Capítulo I

ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Extrusión en canal angular constante, ECAC

La deformación plástica es un método efectivo para la modificación de microestructuras y propiedades para diferentes materiales. Hasta ahora las operaciones tradicionales de conformado, tales como la extrusión o el laminado han sido usados para obtener estas modificaciones. Las reducciones múltiples de área de la muestra inicial, están asociadas con esos procesos. Existen también problemas especialmente difíciles de superar cuando se desea sintetizar y procesar nuevos materiales y aleaciones. Cuando el objetivo primario es conseguir estructuras especiales, texturas y cambios en sus propiedades, es necesario el desarrollo de métodos de deformación especial mediante tecnología avanzada para solucionar problemas en ciencia de materiales. ^[5]

En este sentido, en la investigación sobre comportamiento superplástico, existe un gran interés en el desarrollo de procesos para la obtención de microestructuras con tamaño de grano ultrafino.

Dentro de los métodos conocidos de deformación plástica severa (DPS), ECAC es considerado como un proceso con alto potencial para cambiar las propiedades del material de forma significativa y controlada. ^[2]

1.1.1 Deformación por deslizamiento puro

El principio de ECAC consiste en procesar una probeta a través de un dado que contiene dos canales, cuyas áreas de sección transversal son iguales. Los canales intersecan en un ángulo Φ . Deformaciones plásticas intensas son generadas dentro de la muestra cada vez que se procesa a través del plano de deslizamiento contenido en el centro del dado. La muestra sale del dado teniendo la misma área de sección transversal. Como ésta área no cambia, el proceso repetitivo puede ser usado para lograr deformaciones totales muy

altas. El principio general de la extrusión en canal angular constante se muestra en la figura 1.1.

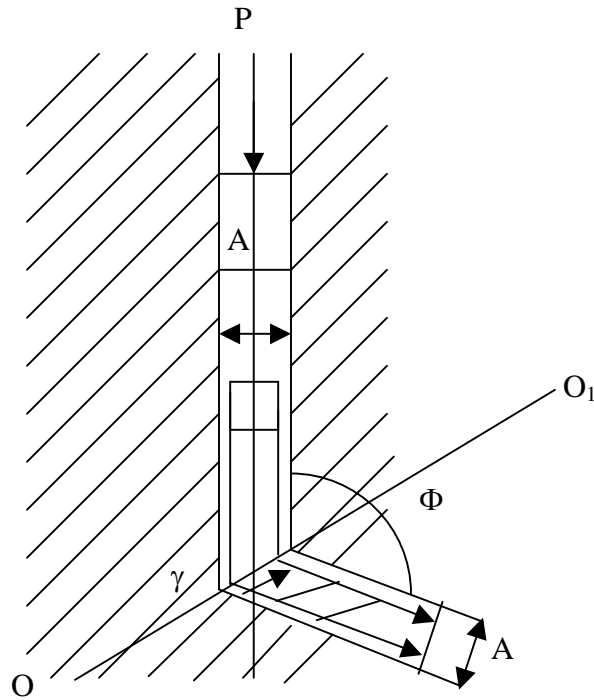


Figura 1.1. Esquema del principio general de la extrusión en canal angular constante.

La herramienta es un bloque con dos canales de áreas idénticas que se intersecan. Una muestra bien lubricada se coloca dentro de uno de los canales y es extrudido al segundo canal. Bajo esas condiciones, la muestra se moverá dentro de los canales como un cuerpo rígido y la deformación se consigue por deslizamiento en una delgada capa (plano de deformación cortante) en el cruce de los canales. De esta forma, la muestra completa es deformada de manera uniforme.

Los análisis muestran que la presión ejercida (p) y el incremento de la intensidad de deformación ($\Delta\epsilon_i$), están en función del ángulo Φ entre los canales y el límite de cedencia del material (Y):

$$\frac{p}{Y} = \Delta\epsilon_i$$

Es evidente que con el proceso ECAC se somete al material a una deformación intensa y uniforme en cada paso de extrusión. Es posible lograrlo mediante presiones relativamente

bajas sin una reducción en el área inicial de la muestra. Esto es una gran ventaja cuando se compara con los procesos actuales de conformado.

Por medio de la técnica de canales constantes, la deformación cortante en la muestra es uniforme, lo que permite determinar la distorsión de elementos microestructurales tales como los granos y fases en cada punto. La figura 1.2 muestra la región delimitada por (a, b, c, d) en el esquema de distorsión causado por deformación cortante, (γ), a lo largo de la línea OO_1 .

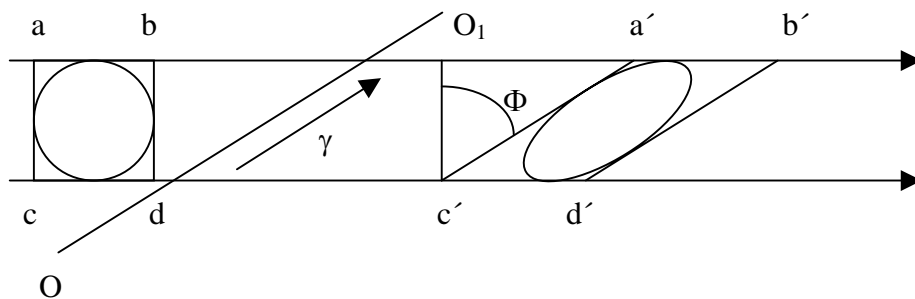


Figura 1.2. Esquema de distorsión bajo deformación cortante.

Las ventajas de ECAC son más evidentes con extrusiones múltiples sobre la muestra. El proceso puede ser repetido fácilmente un número de veces en la misma herramienta. También es posible anticipar que cuatro variables determinarán la naturaleza de la microestructura obtenida mediante ECAC. ^[5]

- i) El ángulo entre las dos porciones del canal, Φ , es importante porque un ángulo cercano a los 90° provoca deformaciones muy intensas.
- ii) La rotación de la muestra entre procesadas repetitivas debido a que activan los diferentes planos de deslizamiento.
- iii) La velocidad de procesamiento, que puede ser variada, no tiene influencia sobre el equilibrio del tamaño de grano.
- iv) La temperatura en que se lleva a cabo el proceso ECAC.

Descripción esquemática del proceso ECAC en ilustración tridimensional en la figura 1.3 [4]

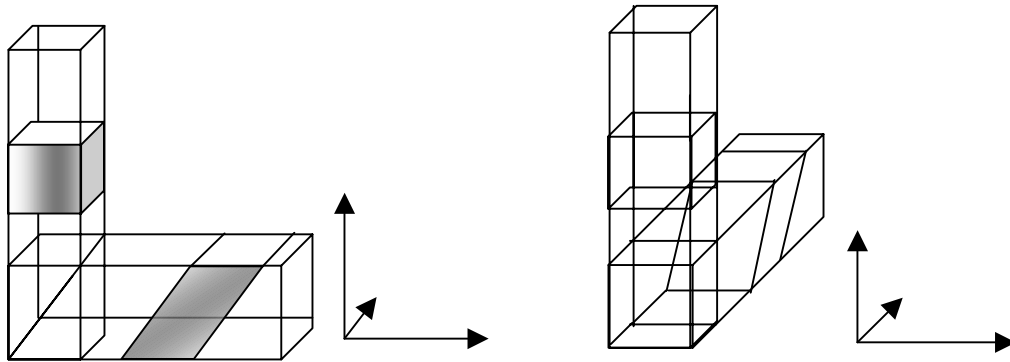


Figura 1.3. Deformación de un elemento cúbico después de un paso a través de un dado de ECAC.

1.1.2 Características óptimas del proceso ECAC

En contraste con las operaciones tradicionales de conformado con deformaciones moderadas, la deformación plástica severa tiene un fuerte efecto de procesamiento mecánico sobre la evolución de la microestructura. Además el proceso de optimización presenta un significativo interés práctico y puede ser el factor clave para su comercialización posterior. Las características de optimización están dadas por las condiciones correspondientes de contacto entre la muestra y el dado en cada paso de extrusión y las orientaciones de la muestra durante deformaciones en pasos múltiples. [6]

i) **Fricción al contacto.** Es la condición más importante, la figura 1.4 presenta una línea de deslizamiento para canales esquinados con un ángulo Φ y fricción al contacto τ . Sólo en condiciones de fricción cero, ($\tau = 0$) la zona plástica es una capa delgada de deslizamiento uniforme en el ángulo Φ para un eje de la muestra. Sin embargo, al existir condiciones de fricción, ya no se trata de un problema trivial y algunos puntos de fricción están presentes siempre aún con los mejores lubricantes. Por otra parte, en ECAC las condiciones de fricción no son idénticas para ambos canales, y es especialmente difícil conseguir bajas fricciones a lo largo de la pared inferior del segundo canal porque existe una presión normal alta y el lubricante se remueve durante la extrusión.

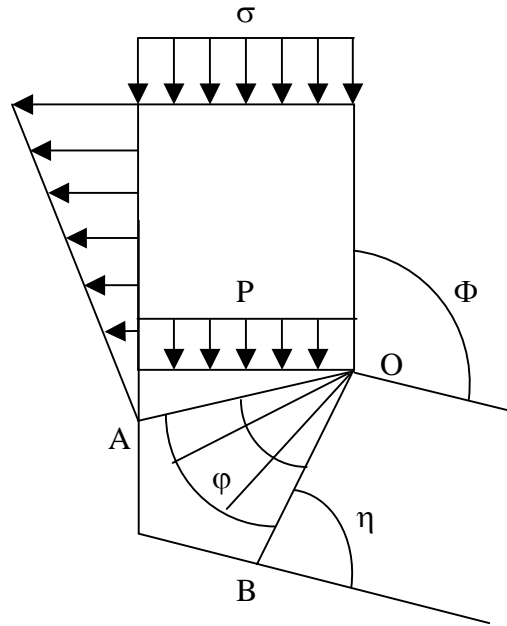


Figura 1.4. Línea de deslizamiento para fricción, τ , en ambos canales

Una complicación adicional es que el deslizamiento es diseñado continuamente en series de micro y macro pasos como AA' en la figura 1.5.A

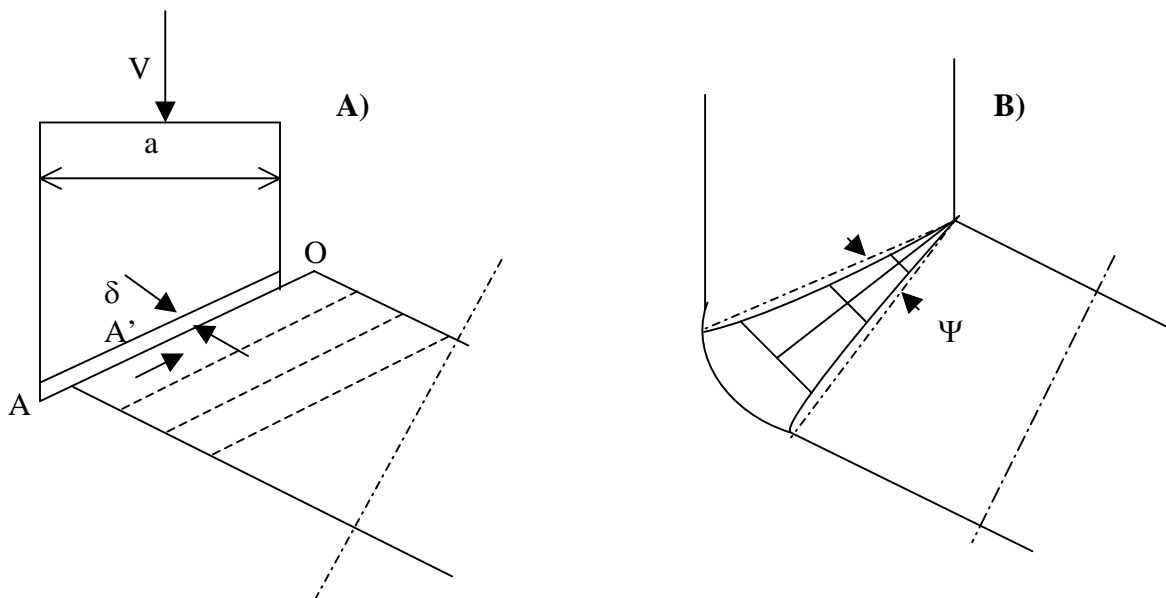


Figura 1.5. A) Flujo discontinuo para condiciones sin fricción y B) Campo de línea de deslizamiento para canales con esquinas redondeadas

ii) **La geometría del canal.** Los canales de corte en la esquina con baja fricción promueven corte uniforme que depende del ángulo Φ .

$$\gamma = 2 \cot \phi \dots\dots\dots(1.1)$$

Para alcanzar una deformación intensiva, el ángulo Φ debería ser suficientemente pequeño, sin embargo para $\Phi < 90^\circ$ una zona muerta del metal se forma en la esquina del canal siempre por condiciones de fricción, además las características óptimas son:

$$\tau \rightarrow 0, \quad \Phi = 90^\circ, \quad \gamma = 2 \dots\dots\dots(1.2)$$

También se ha sugerido el uso de canales con esquinas redondeadas con un ángulo central Ψ (figura 1.5.B). La esquina redondeada permite la lubricación en la pared inferior del dado y tiende a reducir los valores de presión ejercida. Sin embargo, los canales con esquinas redondeadas pueden tener baja uniformidad y una redistribución de deslizamiento en tres direcciones diferentes, reduciendo la eficiencia del proceso. Desde el punto de vista de ingeniería, un cambio de radio de las esquinas a la configuración de la muestra dificulta el uso de paredes móviles y la salida de la muestra del dado.

iii) **Velocidades de deformación.** Es necesario para describir el comportamiento del material durante la ECAC. Para el caso de bajas fricciones una delgada zona de corte es $\delta \sim (0.05-0.1)a$, donde a es una muestra delgada (Figura 1.5.A). Para una velocidad de extrusión V , el componente de velocidad normal v_n a la zona de deslizamiento y tiempo Δt al cruce de esa zona son

$$v_n = V \sin \theta, \quad \Delta t = \frac{\delta}{V_n} = \frac{(0.05 - 0 - 1)a}{V \sin \theta}$$

La última ecuación junto con la fórmula 1.2 da la estimación para la efectiva velocidad de deformación

$$\xi = \frac{\sqrt{3/2}d\gamma}{dt} = \frac{(6-12)V \cos \theta}{a}$$

Esta ecuación muestra que la velocidad de deformación puede ser alta y además bajas velocidades de procesado V , podrían ser usadas para materiales sensibles a la velocidad de deformación.^[6]

iv) La forma de la muestra. Esta presenta algunas restricciones. Aunque algunos canales pueden tener varias formas de secciones transversales, algunos de ellos no son prácticos. Originalmente el ECAC fue desarrollado para largas muestras rectangulares. Después un nuevo concepto del proceso para muestras planas fue también introducido. Para muestras cilíndricas los problemas pueden presentarse a la salida de la muestra del dado, la muestra adquiere otras formas. En este caso paredes móviles del dado no pueden ser usadas. Muestras rectangulares satisfacen estas condiciones.

v) Presión de extrusión y carga. Esta depende del material, la fricción, diseño del dado y forma de la muestra. Para fricciones iguales, τ , en ambos canales, un análisis de líneas de campos de deslizamiento (figura 1.4) da para la presión $P/2K$ aplicado a la frontera plástica AO dentro de la dirección de flujo

$$\frac{P}{2k} = \cot \eta + 2(\eta - \theta) + \frac{\tau}{(2k)[\text{sen} \eta (\text{sen} \eta + \cos \eta)]}$$

Donde k es el esfuerzo de flujo del material. $\eta = \pi/2 - \frac{1}{2} \arccos (\tau/\kappa)$ es un ángulo entre las paredes del dado y las líneas de deslizamiento (figura 1.4).^[6]

1.1.3 Aplicaciones

Como una nueva técnica de procesado metalúrgico, ECAC presenta un gran campo para diferentes aplicaciones como síntesis y procesamiento de materiales porque ambos factores, los esfuerzos severos y la deformación cortante contribuyen significativamente a tener efectos inusuales en la microestructura y las propiedades. Dependiendo del material y condiciones de procesado, ECAC genera diferentes cambios estructurales:

- Refinamiento de grano a niveles sub-micrométricos y nanométricos;
- Refinamiento de fases secundarias y partículas;

- Llenado de vacíos, poros y otros defectos volumétricos;
- Control de textura;
- Transformaciones de fase;
- Incrementa la superplasticidad.

Estos cambios mejoran de manera significativa las propiedades mecánicas y físicas que definen muchas aplicaciones. Esto permite competir con otras aplicaciones de vanguardia; desde una perspectiva práctica, ECAC puede generar beneficios técnicos evidentes tales como la fabricación de productos con calidad superior. Estas ventajas generan un alto potencial para el desarrollo ECAC.

La primer premisa es el diseño y desarrollo de tecnología que permita resolver problemas industriales al optimizar el proceso de deslizamiento y lograr deformaciones efectivas con el menor número de pasos de extrusión (de uno a dos). La modificación de la microestructura a partir de los lingotes de los productos de fundición pueden ser aplicados a diferentes metales y aleaciones a altas temperaturas de formación. Las ventajas de ECAC incluyen que el área de sección transversal de la muestra permanece constante y una mayor calidad del material procesado. Las aleaciones ligeras presentan las mejores alternativas para iniciar la comercialización de ECAC con inversiones moderadas en una producción a escala relativamente grande. Tecnología similar puede ser usada en metalurgia de polvos para la consolidación y enlazamiento de materiales, en la fabricación de compuestos y cartuchos para tixoforado.^[6]

La segunda premisa que es la comercialización comprende pasos múltiples en ECAC para producir estructuras con granos ultra finos. La producción a gran escala puede ser utilizadas para la obtención de materiales superplásticos. Con la tecnología existente, la superplasticidad se logra sólo para un número restringido de aleaciones a altas temperaturas y muy bajas velocidades de deformación en láminas del producto. Para estructuras submicrométricas después de ECAC con el suficiente número de pasos (presumiblemente $N \geq 4$) muchas aleaciones exhiben superplasticidad a altas velocidades de deformación y/o bajas temperaturas, haciendo del conformado superplástico una

operación productiva para aleaciones que no presentan ese comportamiento, así como el procesamiento de cantidades relativamente grandes de material. Esto hace posible conformados complicados, precisión en el tamaño y piezas directamente del proceso de extrusión; para fabricación de intrincados, y extrusiones de placas delgadas. La más prometedora alternativa de ECAC se encuentra en la ciencia de materiales con la síntesis de productos únicos con propiedades especiales. Materiales con grano submicrométrico que se caracterizan por combinaciones de altos esfuerzos y buena ductilidad en largas secciones transversales no obtenidas por otras técnicas de procesado. Estas técnicas también muestran un incremento en dureza y alta resistencia a la fatiga. Se ha encontrado que es posible proveer o modificar las propiedades magnéticas, superconductoras, ópticas, semiconductoras de diversas aleaciones durante pasos múltiples en ECAC. Sin embargo, se requiere el desarrollo de un mayor número de técnicas de procesado para encontrar aplicaciones efectivas de tales materiales. El primer dato de comercialización industrial a gran escala de ECAC para aluminio eran cartuchos con masas superiores a los 34 kg; confirmando que esta tecnología es redituable y está lista para otras aplicaciones.

Desde un punto de vista práctico, ECAC puede ser utilizado para modificar muchas características en el material. El diseño óptimo corresponde a un contacto mínimo por fricción, una herramienta con un ángulo Φ de 90° , canales con forma esquinas y muestras cuadradas, planas y cilíndricas, durante pasos múltiples de ECAC en proceso de optimización para problemas particulares podría incluir también la elección correspondiente de la ruta con un menor número de pasos de extrusión. La eliminación de fricción al contacto a lo largo de la pared inferior del segundo canal es especialmente importante. Las posibles áreas para la comercialización de ECAC pueden incluir aplicaciones industriales ordinarias y únicas. Eso requiere del diseño y desarrollo para optimizar la tecnología e ingeniería de extrusión en canal angular constante con el menor número de pasos, producción gran escala y aprovechamiento multidisciplinario para nuevos productos.^[6]

Capítulo II SUSTENTO TEÓRICO

2.1 ECAC

En este capítulo se desarrollan las ecuaciones que permiten calcular las deformaciones generadas en el material por extrusión en canal angular constante, ECAC, y se describen las diferentes rutas que pueden seguirse para deformar un material.

El proceso ECAC consiste en presionar muestras a través de un dado que contiene dos canales de áreas iguales en la sección transversal que intersecan en un ángulo dado (Φ).

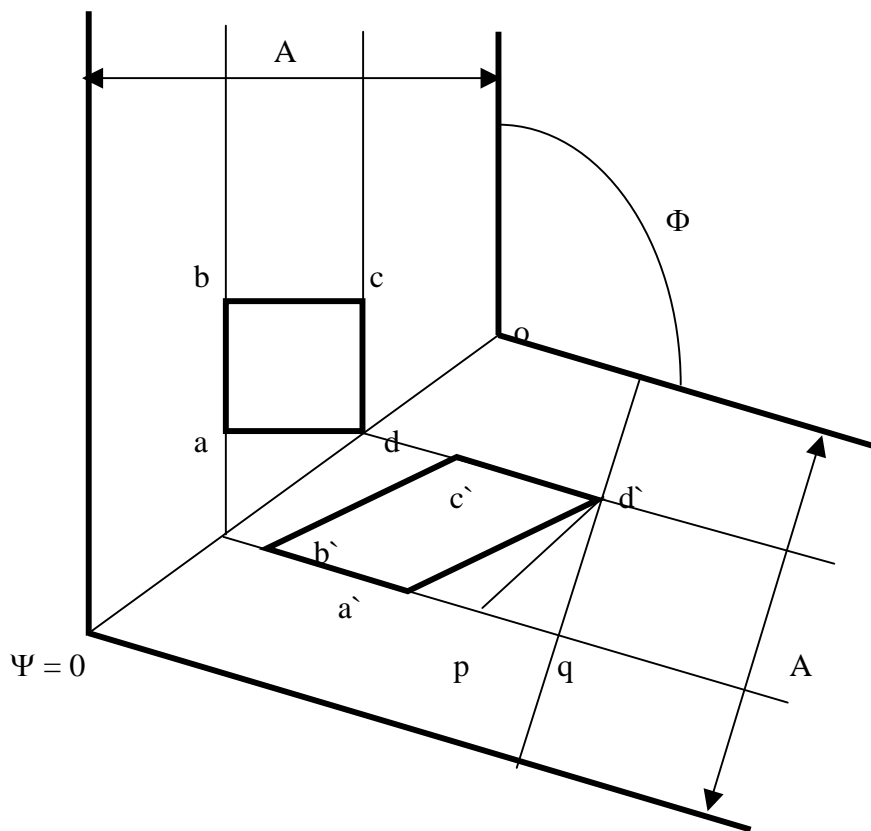


Figura 2. 1 Principio de extrusión en canal angular constante. $\Psi = 0$.

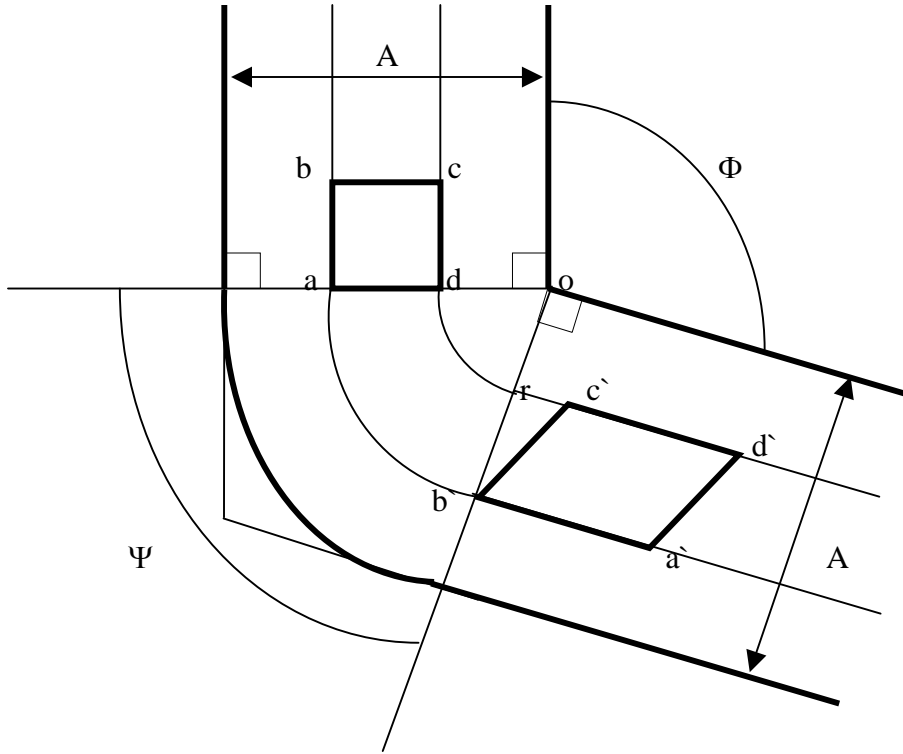


Figura 2.2. Principio de extrusión en canal angular constante. $\Psi = \pi - \Phi$

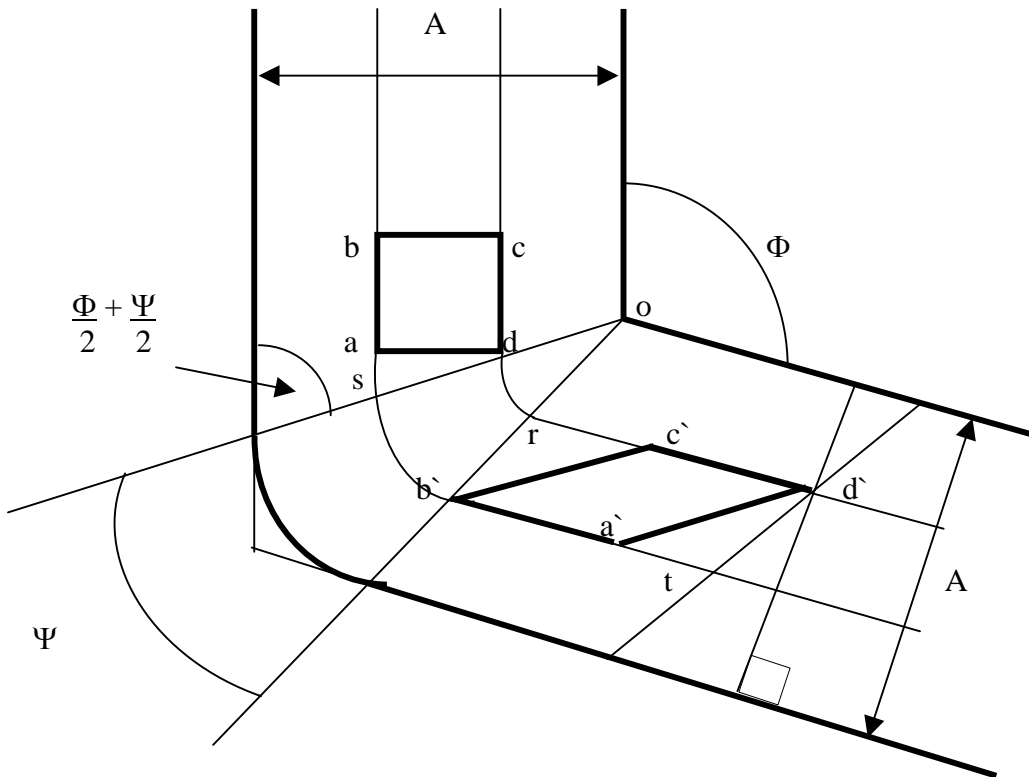


Figura 2.3. Principio de extrusión en canal angular constante. Ψ está entre $\Psi = 0$ y $\Psi = \pi - \Phi$

En la figuras 2.1, 2.2 y 2.3 se ilustra esquemáticamente el principio de la extrusión en canal angular constante donde Φ es el ángulo de intersección de los dos canales y Ψ es el ángulo subtendido por el arco de curvatura en el punto de intersección: (2.1) $\Psi = 0$, (2.2) $\Psi = \pi - \Phi$, (2.3) Ψ se encuentra entre $\Psi = 0$ y $\Psi = \pi - \Phi$.

La extrusión del material puede explicarse usando una configuración cuadrada como en la figura 2.1 o con curvatura en el punto más alejado entre los dos canales como en las figuras 2.2 y 2.3. Definiendo a Ψ como el ángulo subtendido por el arco de curvatura, Las figuras 2.1 y 2.2 corresponden a las condiciones límite de $\Psi = 0$ y $\Psi = \pi - \Phi$, respectivamente, y la figura 2.3 corresponde a la situación intermedia donde Ψ se presenta como un ángulo arbitrario entre $\Psi = 0$ y $\Psi = \pi - \Phi$

En la figura 2.1 donde $\Psi = 0$, un pequeño elemento de la muestra, inicialmente cuadrado en la sección transversal con dimensiones dadas por abcd, se deforma por corte al pasar a través del dado a la configuración definida por a'b'c'd'. Usando la notación de la figura 2.1 se tiene que la deformación cortante, γ , está dada por

$$\gamma = \frac{a'q}{qd'}$$

Donde $qd' = ad$ y

$a'b' = dc' = a'p = pq = ad \cot(\Phi/2)$ así que $a'q = 2ad \cot(\Phi/2)$. Por lo tanto, para la condición donde $\Psi = 0$

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2}\right) \dots \dots \dots (2.1)$$

En la figura 2.2 donde $\Psi = \pi - \Phi$, la deformación cortante está dada por

$$\gamma = \frac{rc'}{rb'}$$

Donde $rb' = da = (oa - od)$ y

$ab' = dc' = oa\Psi = (rc' + od\Psi)$ así que $rc' = oa - od\Psi$. Por lo tanto, para esta condición, tenemos

$$\gamma = \Psi \dots \dots \dots (2.2)$$

Cuando Ψ representa una situación intermedia, la deformación cortante está dada por

$$\gamma = \frac{a'u}{d'u}$$

Donde $d'u = ad$

$$a'u = (at + tu) = (rc' + as)$$

$$as = ad (\cot \Phi/2 + \Psi/2)$$

$$ab' = dc' = (as + os\Psi) = rc' + od\Psi$$

$$\text{y } (os - od) = ad \csc(\Phi/2 + \Psi/2),$$

$$\text{así que } a'u = 2 ad \cot(\Phi/2 + \Psi/2) + ad \Psi \csc(\Phi/2 + \Psi/2)$$

Por lo tanto, la deformación de cortante para esta condición intermedia está dada por

$$\gamma = \left[2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \dots\dots\dots (2.3)$$

Entonces, tenemos que la ecuación 2.3 se reduce a la ecuación 2.1 cuando $\Psi = 0$ y a la ecuación 2.2 cuando $\Psi = \pi - \Phi$

La deformación equivalente, ε_{eq} , está representada por

$$\varepsilon_{eq} = \left[\frac{2}{3} \left[\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2}{2} \right] \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Donde $\varepsilon_x^2 = 0$, $\varepsilon_y^2 = 0$ y $\varepsilon_z^2 = 0$

Así que la deformación, $\bar{\varepsilon}$, después de un ciclo es

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \dots\dots\dots (2.5)$$

Cuando la muestra pasa a través del dado, el valor preciso de la deformación equivalente de von Mises es dependiente de los valores de esos dos ángulos Φ y Ψ . Como las dimensiones del área de sección transversal de la muestra permanecen sin cambio con un paso de extrusión a través del dado, la muestra puede ser procesada repetidamente con el fin de lograr una deformación total muy alta.

Modelos experimentales han confirmado la validez de la ecuación 2.5, excepto en las zonas adyacentes más próximas a las paredes del dado donde puede haber efectos de fricción. En suma, ha habido una razonable confirmación de esta ecuación a partir de los experimentos usando modelos e incorporando patrones de cuadrícula (figura 2.4) y excepto sólo en las proximidades de la muestra con los paredes del dado.

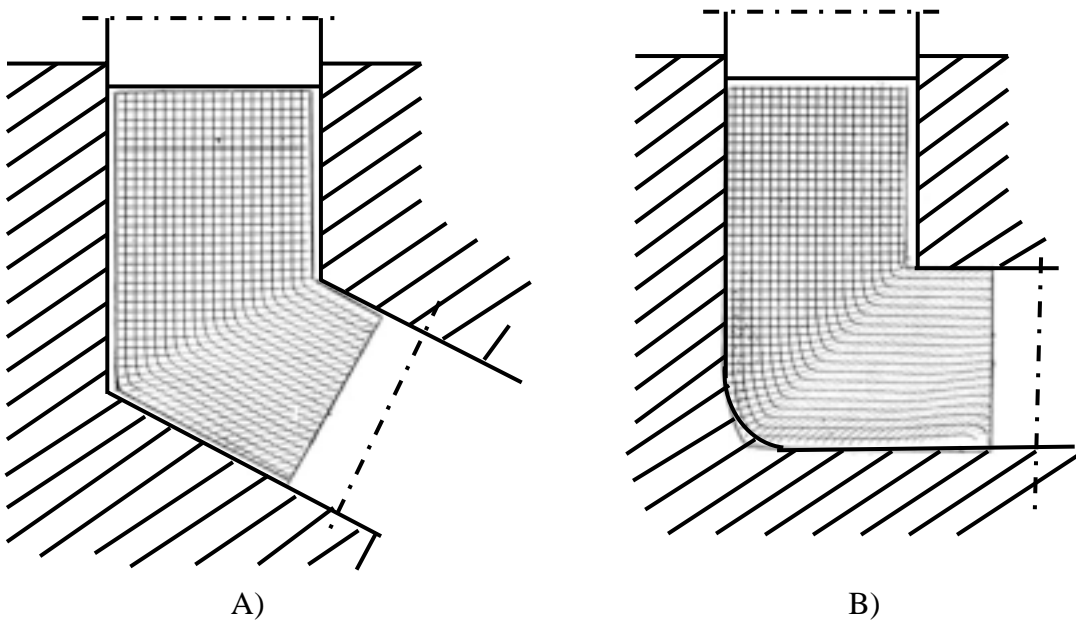


Figura 2.4. Esquema de la distorsión de cuadrículas coordinadas. A) con $\Phi > 120^\circ$ y B) $\Phi = 90^\circ$
y $\Psi = 20^\circ$

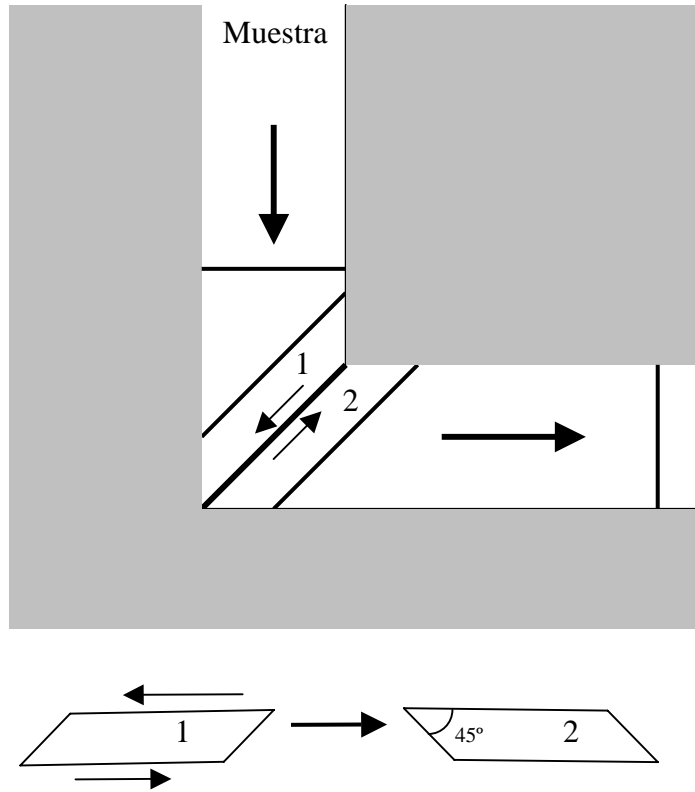


Figura 2.5. Principio de deslizamiento entre los elementos 1 y 2

La deformación impuesta sobre el material se ilustra en la figura 2.5, donde por simplicidad se asume que el ángulo de intersección entre los dos canales tiene un valor de 90° . Entonces, el deslizamiento es impuesto en el plano de corte entre los dos segmentos adyacentes etiquetados como 1 y 2.

2.1.1 Significado del ángulo Φ

Una serie de experimentos detallados usando dados con valores del ángulo Φ de entre 90° y 157.5° muestran que una estructura de grano ultrafino y esencialmente equiaxiales, separados por límites de grano con altos ángulos de desorientación, fueron obtenidos más fácilmente cuando se imponía una deformación muy intensa con valores de Φ muy cercanos a 90° . Para valores de $\Phi = 90^\circ$, a partir de la ecuación 2.5, se tiene que la deformación impuesta en un solo paso a través del dado es muy cercana a 1 para

cualquier valor de Ψ . Por lo tanto, la deformación es muy cercana a $\approx N$ en el total de N pasadas a través del dado.

2.1.2 Pasos múltiples de extrusión

Para alcanzar grandes deformaciones y los efectos estructurales requeridos, ECAC podría repetirse cierto número de veces. Para el caso óptimo de baja fricción, dados con forma esquinada y ángulos Φ y Ψ conocidos, la deformación acumulada de von Mises después de N pasos de extrusión puede ser estimada mediante la ecuación

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \dots\dots\dots (2.6)$$

Una expresión alternativa fue propuesta donde ε_N está dada por

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \right] \dots\dots\dots (2.7)$$

Sin embargo, se puede demostrar por medio de cálculos que las ecuaciones 2.6 y 2.7 dan valores idénticos para ε_N por arriba y por debajo de las uniones del arco del ángulo Ψ y difieren por $< 5\%$ bajo todas las otras condiciones para cualquier ángulo $\Phi \geq 90^\circ$.

Ha sido desarrollada también una aproximación similar para estimar la deformación en situaciones donde los dos canales del dado tienen diferentes dimensiones de secciones transversales.

2.1.3 Efecto de la rotación de la muestra entre extrusiones repetitivas

Cuando la muestra es extrudida de manera repetitiva a través de un dado de ECAC, las características globales de deslizamiento dentro de la estructura cristalina pueden ser modificadas por cambios en la orientación de la muestra entre pasos de extrusión sucesivos con rotaciones alrededor de los ejes XYZ para promover rutas efectivas de extrusión cruzada.

Posibles ángulos de rotaciones φ_1 , φ_2 , φ_3 , pueden ser vistas en la figura 2.6 Hay numerosas combinaciones de posibles rotaciones cuando el número de pasadas se incrementa. Sin embargo todas las situaciones pueden ser reducidas a combinaciones de 4 rutas básicas.

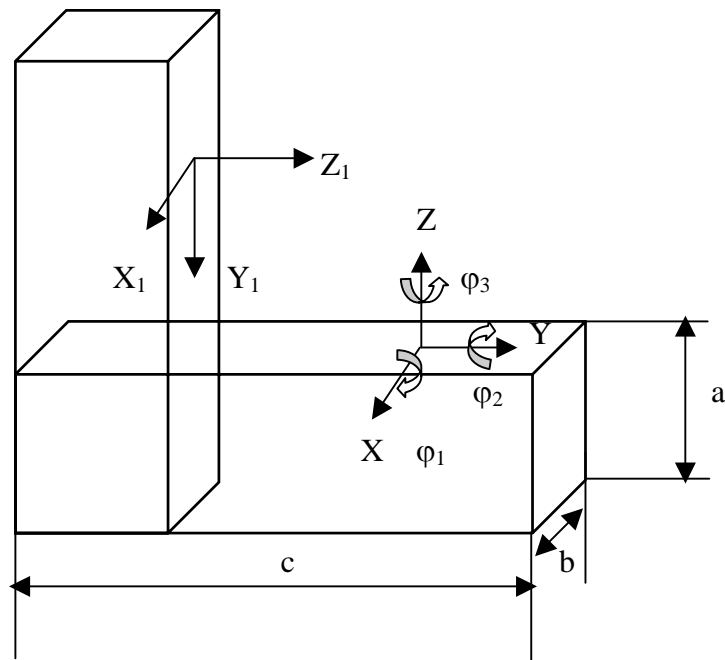


Figura 2.6. Rotación de la muestra alrededor de los ejes X, Y, Z entre pasos sucesivos de ECAC

Ruta A: La muestra conserva la orientación ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$); La muestra no es rotada entre los pasos de extrusión repetitiva.

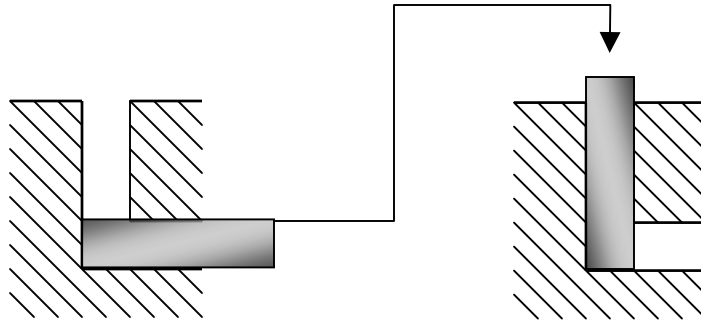


Figura 2.7. Ruta A en pasos múltiples de extrusión.

Ruta B_A: la muestra se rota alternativamente $\pm 90^\circ$ después de cada paso de extrusión alrededor del eje X para muestras alargadas ($\varphi_1 = \pm 90^\circ$, $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$) y alrededor del eje Z para muestras planas ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_3 = \pm 90^\circ$);

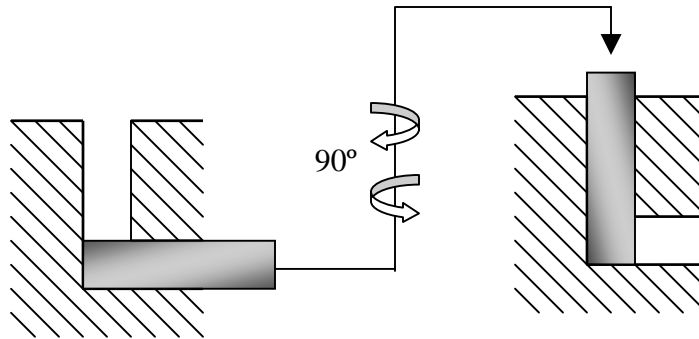


Figura 2.8. Ruta B_A en pasos múltiples de extrusión.

Ruta B_c: Las muestras se rotan 90° dentro de la misma dirección después de cada paso de extrusión alrededor del eje X para muestras alargadas ($\varphi_1 = 90^\circ$, $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$) y alrededor del eje Z para muestra planas ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_3 = 90^\circ$);

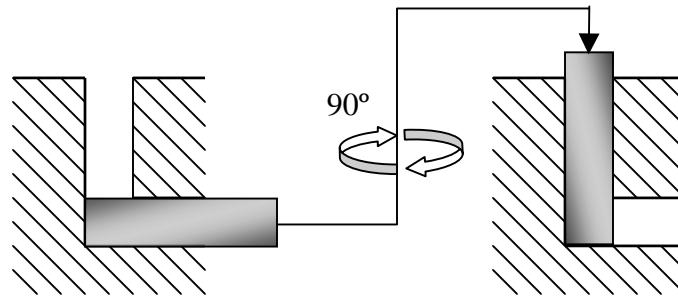


Figura 2.9. Ruta Bc en pasos múltiples de extrusión.

Ruta C: Las muestras se rotan 180° después de cada pasada alrededor del eje X para muestras alargadas ($\varphi_1 = 180^\circ$, $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$) alrededor del eje Z para muestras planas ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_3 = 180^\circ$);

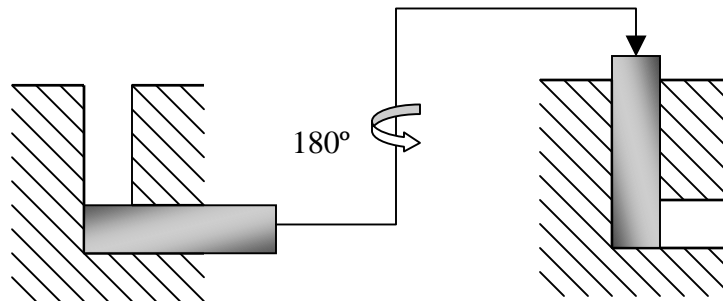


Figura 2.10. Ruta C en pasos múltiples de extrusión.

Para las rutas A y C el flujo plástico es plano. Además, esas rutas permanecen idénticas para cualquier forma de la muestra. La Ruta B_A y B_C corresponden a flujos tridimensionales. Los elementos del material tienen las máximas distorsiones con Rutas A y B_A para flujos planos y tridimensionales respectivamente. Por el contrario, las Rutas B_C y C restauran periódicamente el elemento de forma original después de cada dos y cuatro pasos.

Cada ruta tiene un sistema específico de planos de deslizamiento, direcciones y elementos de distorsión. Ellos generan diferentes efectos sobre la microestructura del material, textura y propiedades. Durante pasos múltiples de ECAC, estas rutas desarrollan patrones característicos de bandas de deslizamiento a lo largo de los planos de deslizamiento en cada paso. Las orientaciones finales de las bandas de deslizamiento

inducidas después de 1, 2, 3 y 4 pasos por las Rutas A, B_A, B_C y C para muestras en forma de barra, con baja fricción y ángulos de $\Phi = 90^\circ$ pueden ser vistos en la tablas 2.1-2.4. Para la solución efectiva de diferentes problemas de formación de microestructuras durante ECAC, la optimización del proceso también incluye la elección de la ruta de procesamiento correspondiente a un número mínimo de pasos de extrusión.

Las tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 esquematizan las deformaciones del material mediante diferentes rutas de proceso ECAC.^[7] Puede apreciarse que la ruta B_A (0°- 90°- 0°- 90°) tiene características de deformación similares a la ruta A, mientras que la ruta B_C, (0°- 90°- 180° - 270°), esquematizada y ampliada en la tabla 2.2 tiene características similares a la ruta C.

Ruta	Plano	Número de pasos								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
A	X									
	Y									
	Z									

Tabla 2.1. Características de la deformación cortante para la ruta de extrusión A

Ruta	Plano	Número de pasos								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
B _A	X									
	Y									
	Z									

Tabla 2.2. Características de deformación cortante para la ruta de extrusión B_A

La ruta A exhibe continuos cambios en los planos X y Y pero no deformaciones en el elemento cúbico del plano Z. La ruta B_A exhibe continuos cambios en los tres planos. En contraste, el elemento cúbico es restablecido después de $4n$ pasos de extrusión en la ruta B_c y $2n$ pasos de extrusión en la ruta C, donde n es un entero. En suma, cuando se usa la ruta C no hay deformación en el plano Z. ^[6,7,8]

Ruta	Plano	Número de pasos								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
B _c	X									
	Y									
	Z									

Tabla 2.3. Características de deformación cortante para la ruta de extrusión B_c




























Ruta	Plano	Número de pasos								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
C	X									
	Y									
	Z									

Tabla 2.4. Características de deformación cortante para la ruta de extrusión C

Capítulo II SUSTENTO TEÓRICO

2.1 ECAC

En este capítulo se desarrollan las ecuaciones que permiten calcular las deformaciones generadas en el material por extrusión en canal angular constante, ECAC, y se describen las diferentes rutas que pueden seguirse para deformar un material.

El proceso ECAC consiste en presionar muestras a través de un dado que contiene dos canales de áreas iguales en la sección transversal que intersecan en un ángulo dado (Φ).

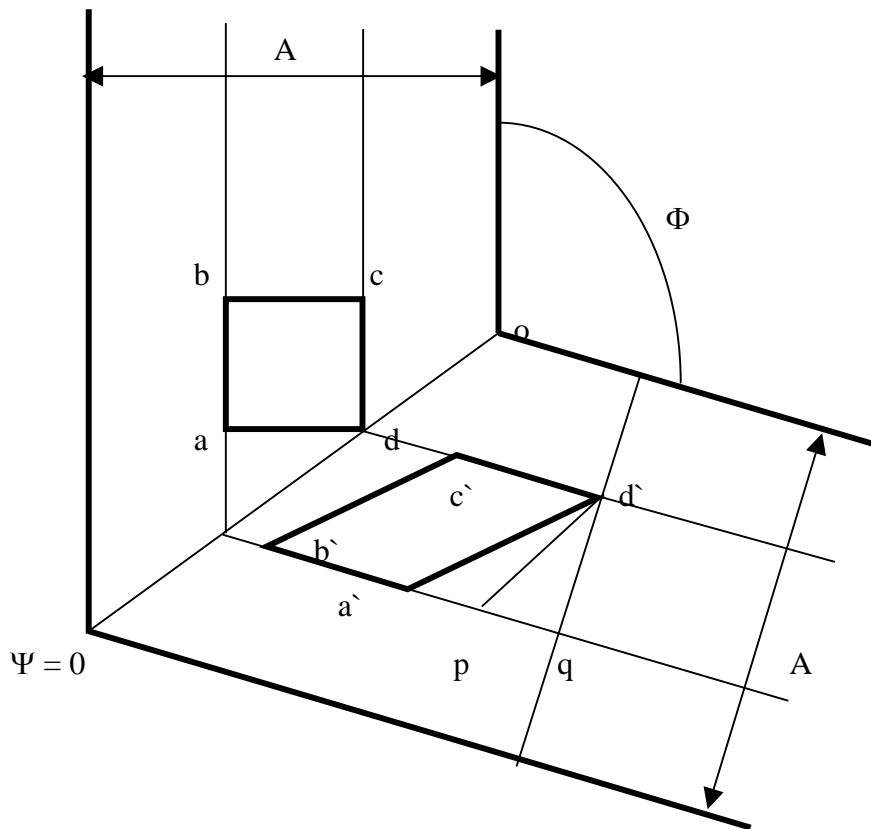


Figura 2. 1 Principio de extrusión en canal angular constante. $\Psi = 0$.

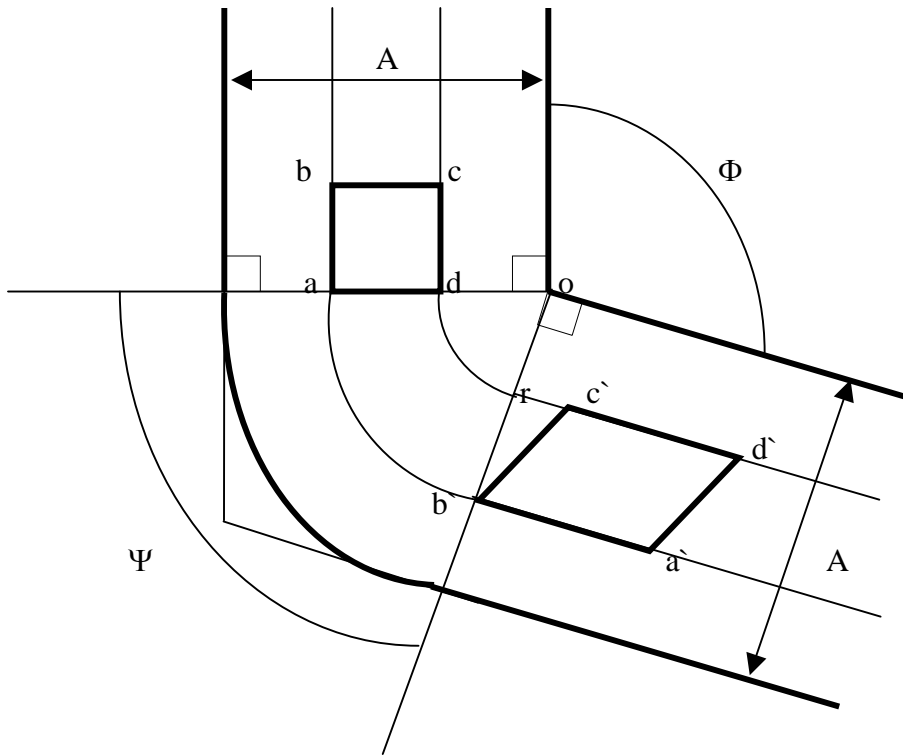


Figura 2.2. Principio de extrusión en canal angular constante. $\Psi = \pi - \Phi$

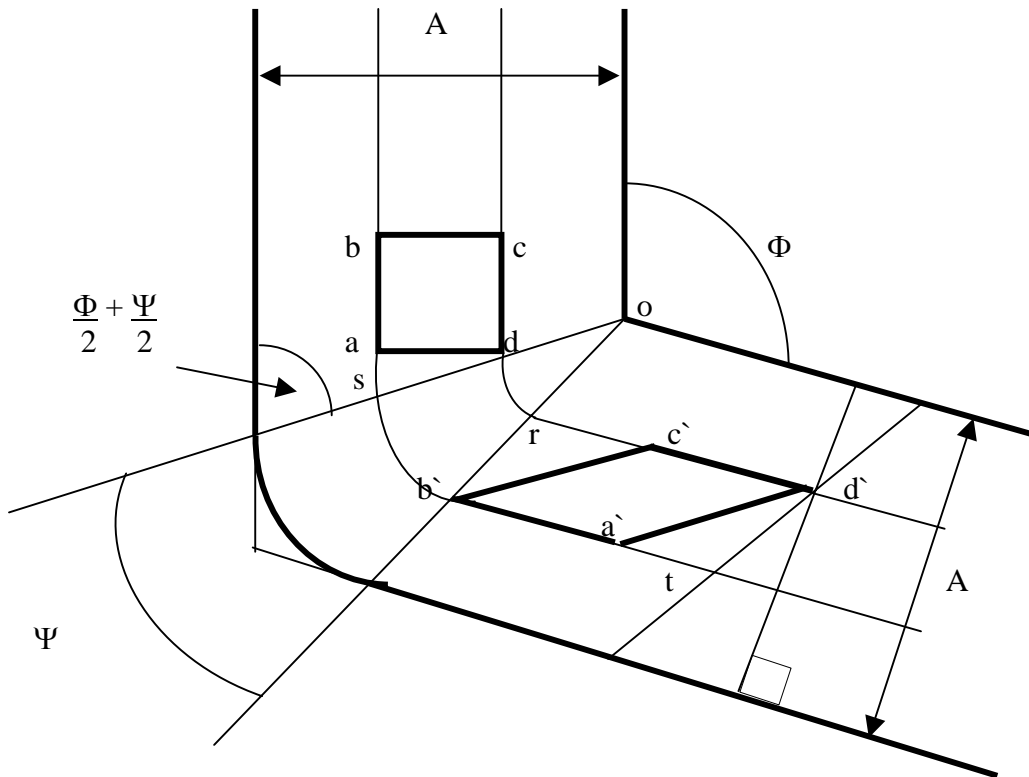


Figura 2.3. Principio de extrusión en canal angular constante. Ψ está entre $\Psi = 0$ y $\Psi = \pi - \Phi$

En la figuras 2.1, 2.2 y 2.3 se ilustra esquemáticamente el principio de la extrusión en canal angular constante donde Φ es el ángulo de intersección de los dos canales y Ψ es el ángulo subtendido por el arco de curvatura en el punto de intersección: (2.1) $\Psi = 0$, (2.2) $\Psi = \pi - \Phi$, (2.3) Ψ se encuentra entre $\Psi = 0$ y $\Psi = \pi - \Phi$.

La extrusión del material puede explicarse usando una configuración cuadrada como en la figura 2.1 o con curvatura en el punto más alejado entre los dos canales como en las figuras 2.2 y 2.3. Definiendo a Ψ como el ángulo subtendido por el arco de curvatura, Las figuras 2.1 y 2.2 corresponden a las condiciones límite de $\Psi = 0$ y $\Psi = \pi - \Phi$, respectivamente, y la figura 2.3 corresponde a la situación intermedia donde Ψ se presenta como un ángulo arbitrario entre $\Psi = 0$ y $\Psi = \pi - \Phi$

En la figura 2.1 donde $\Psi = 0$, un pequeño elemento de la muestra, inicialmente cuadrado en la sección transversal con dimensiones dadas por abcd, se deforma por corte al pasar a través del dado a la configuración definida por a'b'c'd'. Usando la notación de la figura 2.1 se tiene que la deformación cortante, γ , está dada por

$$\gamma = \frac{a'q}{qd'}$$

Donde $qd' = ad$ y

$a'b' = dc' = a'p = pq = ad \cot(\Phi/2)$ así que $a'q = 2ad \cot(\Phi/2)$. Por lo tanto, para la condición donde $\Psi = 0$

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2}\right) \dots\dots\dots (2.1)$$

En la figura 2.2 donde $\Psi = \pi - \Phi$, la deformación cortante está dada por

$$\gamma = \frac{rc'}{rb'}$$

Donde $rb' = da = (oa - od)$ y

$ab' = dc' = oa\Psi = (rc' + od\Psi)$ así que $rc' = oa - od\Psi$. Por lo tanto, para esta condición, tenemos

$$\gamma = \Psi \dots\dots\dots (2.2)$$

Cuando Ψ representa una situación intermedia, la deformación cortante está dada por

$$\gamma = \frac{a'u}{d'u}$$

Donde $d'u = ad$

$$a'u = (at + tu) = (rc' + as)$$

$$as = ad (\cot \Phi/2 + \Psi/2)$$

$$ab' = dc' = (as + os\Psi) = rc' + od\Psi$$

$$\text{y } (os - od) = ad \csc(\Phi/2 + \Psi/2),$$

$$\text{así que } a'u = 2 ad \cot(\Phi/2 + \Psi/2) + ad \Psi \csc(\Phi/2 + \Psi/2)$$

Por lo tanto, la deformación de cortante para esta condición intermedia está dada por

$$\gamma = \left[2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \dots\dots\dots (2.3)$$

Entonces, tenemos que la ecuación 2.3 se reduce a la ecuación 2.1 cuando $\Psi = 0$ y a la ecuación 2.2 cuando $\Psi = \pi - \Phi$

La deformación equivalente, ε_{eq} , está representada por

$$\varepsilon_{eq} = \left[\frac{2}{3} \left[\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2}{2} \right] \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Donde $\varepsilon_x^2 = 0$, $\varepsilon_y^2 = 0$ y $\varepsilon_z^2 = 0$

Así que la deformación, $\bar{\varepsilon}$, después de un ciclo es

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \dots\dots\dots (2.5)$$

Cuando la muestra pasa a través del dado, el valor preciso de la deformación equivalente de von Mises es dependiente de los valores de esos dos ángulos Φ y Ψ . Como las dimensiones del área de sección transversal de la muestra permanecen sin cambio con un paso de extrusión a través del dado, la muestra puede ser procesada repetidamente con el fin de lograr una deformación total muy alta.

Modelos experimentales han confirmado la validez de la ecuación 2.5, excepto en las zonas adyacentes más próximas a las paredes del dado donde puede haber efectos de fricción. En suma, ha habido una razonable confirmación de esta ecuación a partir de los experimentos usando modelos e incorporando patrones de cuadrícula (figura 2.4) y excepto sólo en las proximidades de la muestra con los paredes del dado.

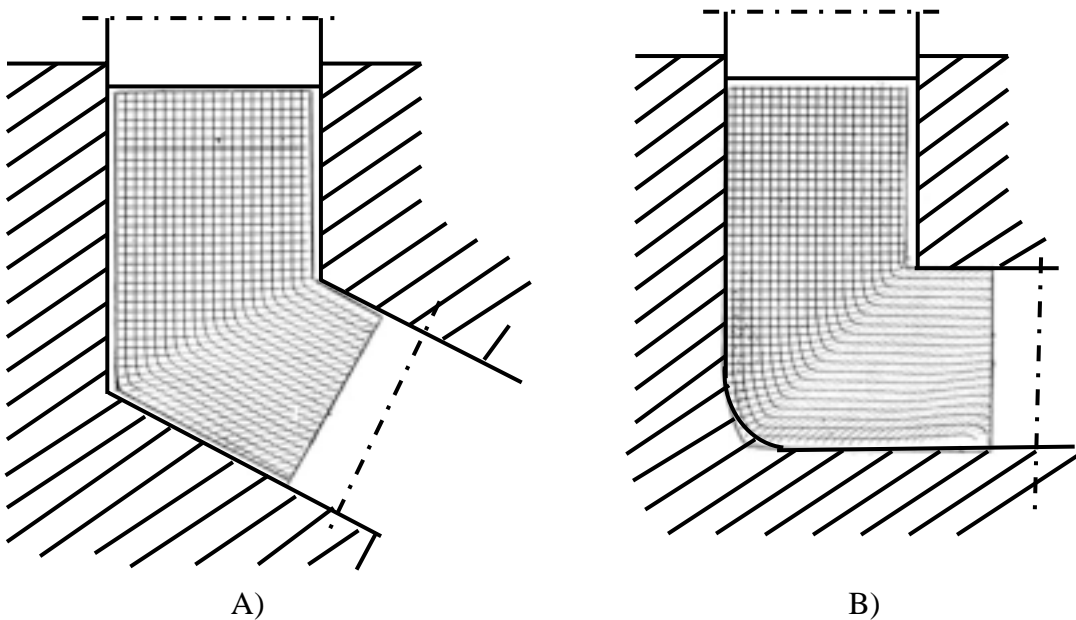


Figura 2.4. Esquema de la distorsión de cuadrículas coordinadas. A) con $\Phi > 120^\circ$ y B) $\Phi = 90^\circ$
y $\Psi = 20^\circ$

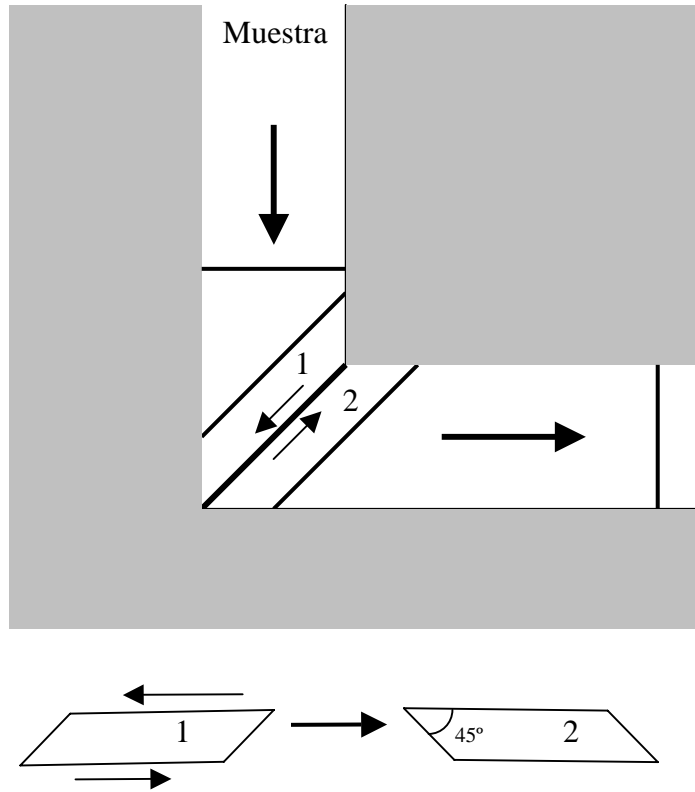


Figura 2.5. Principio de deslizamiento entre los elementos 1 y 2

La deformación impuesta sobre el material se ilustra en la figura 2.5, donde por simplicidad se asume que el ángulo de intersección entre los dos canales tiene un valor de 90° . Entonces, el deslizamiento es impuesto en el plano de corte entre los dos segmentos adyacentes etiquetados como 1 y 2.

2.1.1 Significado del ángulo Φ

Una serie de experimentos detallados usando dados con valores del ángulo Φ de entre 90° y 157.5° muestran que una estructura de grano ultrafino y esencialmente equiaxiales, separados por límites de grano con altos ángulos de desorientación, fueron obtenidos más fácilmente cuando se imponía una deformación muy intensa con valores de Φ muy cercanos a 90° . Para valores de $\Phi = 90^\circ$, a partir de la ecuación 2.5, se tiene que la deformación impuesta en un solo paso a través del dado es muy cercana a 1 para

cualquier valor de Ψ . Por lo tanto, la deformación es muy cercana a $\approx N$ en el total de N pasadas a través del dado.

2.1.2 Pasos múltiples de extrusión

Para alcanzar grandes deformaciones y los efectos estructurales requeridos, ECAC podría repetirse cierto número de veces. Para el caso óptimo de baja fricción, dados con forma esquinada y ángulos Φ y Ψ conocidos, la deformación acumulada de von Mises después de N pasos de extrusión puede ser estimada mediante la ecuación

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right] \dots\dots\dots (2.6)$$

Una expresión alternativa fue propuesta donde ε_N está dada por

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \right] \dots\dots\dots (2.7)$$

Sin embargo, se puede demostrar por medio de cálculos que las ecuaciones 2.6 y 2.7 dan valores idénticos para ε_N por arriba y por debajo de las uniones del arco del ángulo Ψ y difieren por $< 5\%$ bajo todas las otras condiciones para cualquier ángulo $\Phi \geq 90^\circ$.

Ha sido desarrollada también una aproximación similar para estimar la deformación en situaciones donde los dos canales del dado tienen diferentes dimensiones de secciones transversales.

2.1.3 Efecto de la rotación de la muestra entre extrusiones repetitivas

Cuando la muestra es extrudida de manera repetitiva a través de un dado de ECAC, las características globales de deslizamiento dentro de la estructura cristalina pueden ser modificadas por cambios en la orientación de la muestra entre pasos de extrusión sucesivos con rotaciones alrededor de los ejes XYZ para promover rutas efectivas de extrusión cruzada.

Posibles ángulos de rotaciones φ_1 , φ_2 , φ_3 , pueden ser vistas en la figura 2.6 Hay numerosas combinaciones de posibles rotaciones cuando el número de pasadas se incrementa. Sin embargo todas las situaciones pueden ser reducidas a combinaciones de 4 rutas básicas.

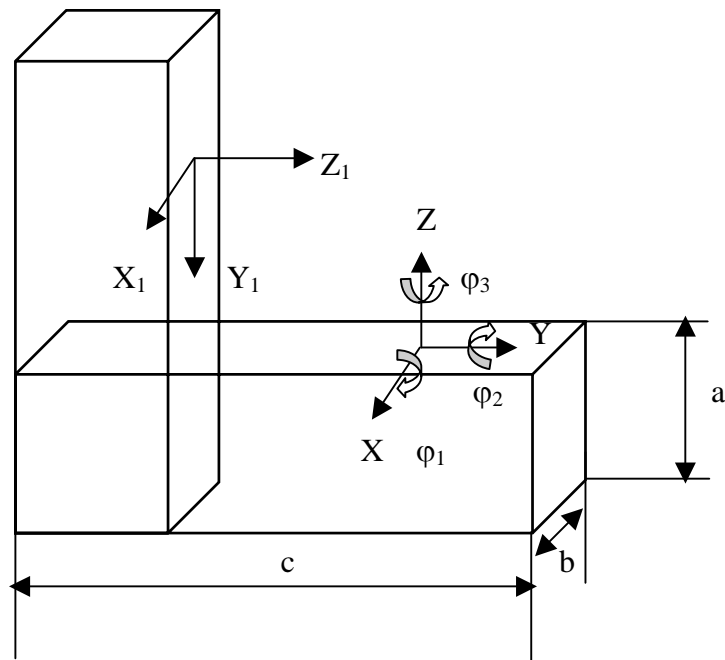


Figura 2.6. Rotación de la muestra alrededor de los ejes X, Y, Z entre pasos sucesivos de ECAC

Ruta A: La muestra conserva la orientación ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$); La muestra no es rotada entre los pasos de extrusión repetitiva.

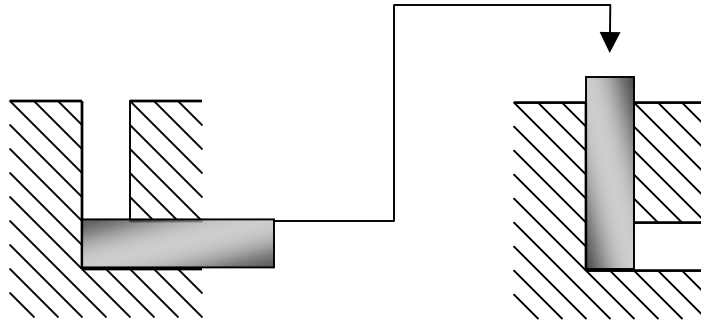


Figura 2.7. Ruta A en pasos múltiples de extrusión.

Ruta B_A: la muestra se rota alternativamente $\pm 90^\circ$ después de cada paso de extrusión alrededor del eje X para muestras alargadas ($\varphi_1 = \pm 90^\circ$, $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$) y alrededor del eje Z para muestras planas ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_3 = \pm 90^\circ$);

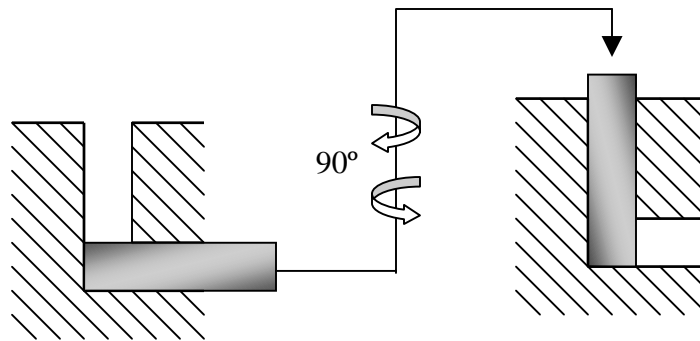


Figura 2.8. Ruta B_A en pasos múltiples de extrusión.

Ruta B_c: Las muestras se rotan 90° dentro de la misma dirección después de cada paso de extrusión alrededor del eje X para muestras alargadas ($\varphi_1 = 90^\circ$, $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$) y alrededor del eje Z para muestra planas ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_3 = 90^\circ$);

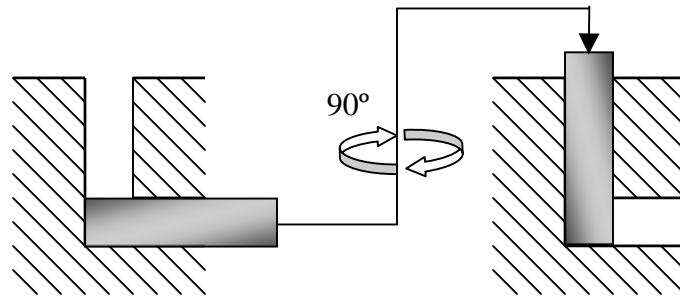


Figura 2.9. Ruta Bc en pasos múltiples de extrusión.

Ruta C: Las muestras se rotan 180° después de cada pasada alrededor del eje X para muestras alargadas ($\varphi_1 = 180^\circ$, $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$) alrededor del eje Z para muestras planas ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_3 = 180^\circ$);

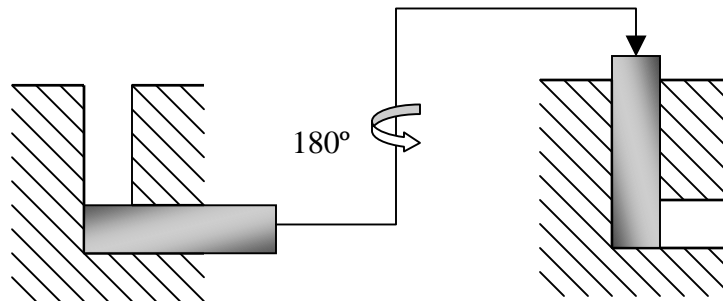


Figura 2.10. Ruta C en pasos múltiples de extrusión.

Para las rutas A y C el flujo plástico es plano. Además, esas rutas permanecen idénticas para cualquier forma de la muestra. La Ruta B_A y B_C corresponden a flujos tridimensionales. Los elementos del material tienen las máximas distorsiones con Rutas A y B_A para flujos planos y tridimensionales respectivamente. Por el contrario, las Rutas B_C y C restauran periódicamente el elemento de forma original después de cada dos y cuatro pasos.

Cada ruta tiene un sistema específico de planos de deslizamiento, direcciones y elementos de distorsión. Ellos generan diferentes efectos sobre la microestructura del material, textura y propiedades. Durante pasos múltiples de ECAC, estas rutas desarrollan patrones característicos de bandas de deslizamiento a lo largo de los planos de deslizamiento en cada paso. Las orientaciones finales de las bandas de deslizamiento

inducidas después de 1, 2, 3 y 4 pasos por las Rutas A, B_A, B_C y C para muestras en forma de barra, con baja fricción y ángulos de $\Phi = 90^\circ$ pueden ser vistos en la tablas 2.1-2.4. Para la solución efectiva de diferentes problemas de formación de microestructuras durante ECAC, la optimización del proceso también incluye la elección de la ruta de procesamiento correspondiente a un número mínimo de pasos de extrusión.

Las tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 esquematizan las deformaciones del material mediante diferentes rutas de proceso ECAC.^[7] Puede apreciarse que la ruta B_A (0°- 90°- 0°- 90°) tiene características de deformación similares a la ruta A, mientras que la ruta B_C, (0°- 90°- 180° - 270°), esquematizada y ampliada en la tabla 2.2 tiene características similares a la ruta C.

Ruta	Plano	Número de pasos								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
A	X									
	Y									
	Z									

Tabla 2.1. Características de la deformación cortante para la ruta de extrusión A

Ruta	Plano	Número de pasos								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
B _A	X									
	Y									
	Z									

Tabla 2.2. Características de deformación cortante para la ruta de extrusión B_A

La ruta A exhibe continuos cambios en los planos X y Y pero no deformaciones en el elemento cúbico del plano Z. La ruta B_A exhibe continuos cambios en los tres planos. En contraste, el elemento cúbico es restablecido después de $4n$ pasos de extrusión en la ruta B_c y $2n$ pasos de extrusión en la ruta C, donde n es un entero. En suma, cuando se usa la ruta C no hay deformación en el plano Z. ^[6,7,8]

Ruta	Plano	Número de pasos								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
B _c	X									
	Y									
	Z									

Tabla 2.3. Características de deformación cortante para la ruta de extrusión B_c




























Ruta	Plano	Número de pasos								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
C	X									
	Y									
	Z									

Tabla 2.4. Características de deformación cortante para la ruta de extrusión C

Capítulo III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se menciona el procedimiento experimental que fue realizado con el propósito de cumplir con los objetivos de este trabajo, (Diagrama 3.1). En la primera parte de este capítulo se describe el rediseño para procesos de extrusión en canal angular constante que incluyen los planos para la fabricación del sistema, así como los esquemas de la implementación del arreglo experimental y en una segunda parte se detalla la metodología que se siguió con el fin de cumplir con el objetivo particular ii.

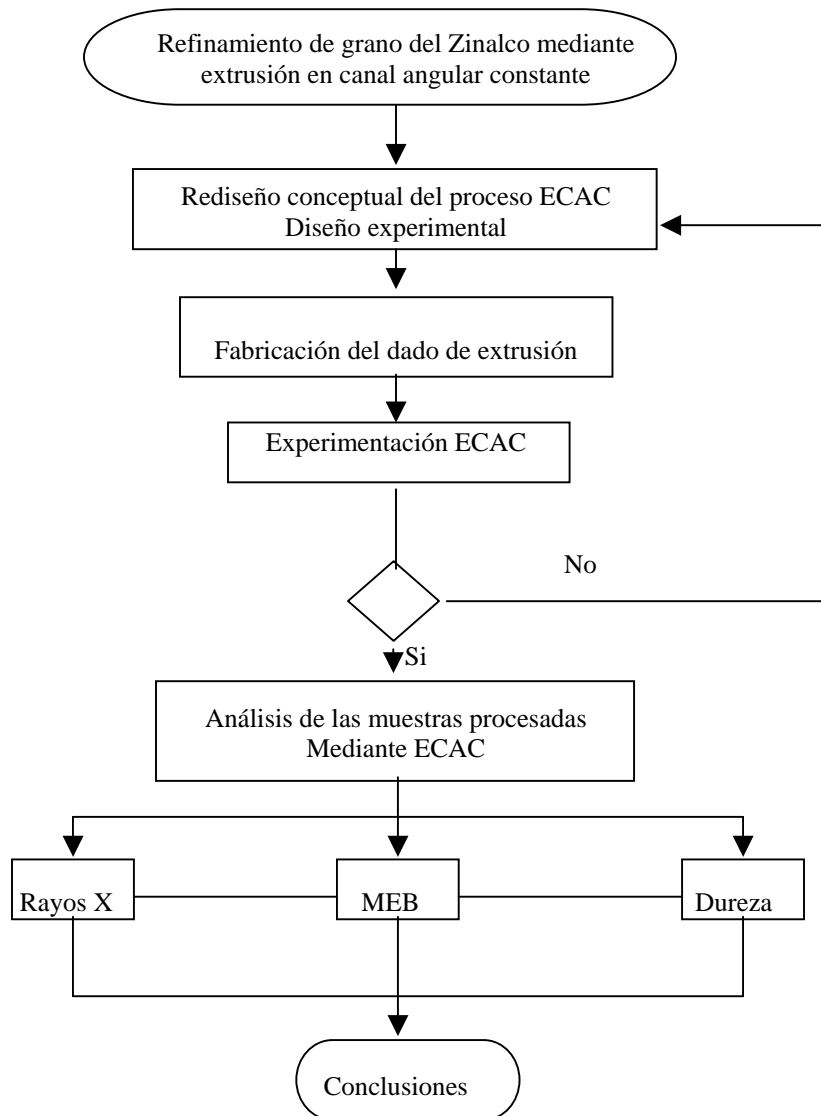


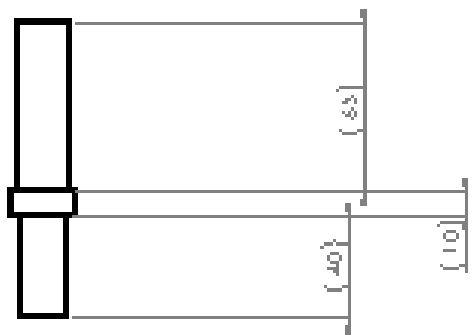
Diagrama de flujo 3.1. Procedimiento experimental

3.1 Planos del sistema ECAC

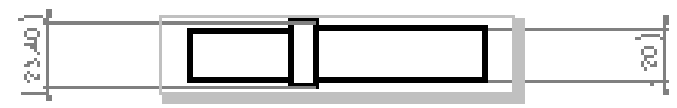
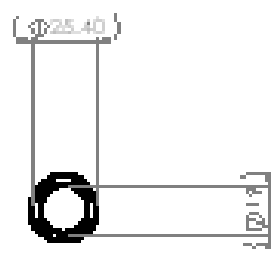
Para el diseño del sistema ECAC se empleó el programa **SolidWorks®**. En las páginas siguientes pueden apreciarse los planos para el sistema de extrusión en canal angular constante desarrollado en el IIM para su adaptación, sujeción y uso en la máquina de compresión Instron modelo 8802. Es posible apreciar los barrenos de entrada y salida del material en la parte superior y frontal respectivamente, así como el barreno de alojamiento para el termopar del sistema regulador de temperatura.

Consideraciones del diseño del dado:

- El dado tiene un canal interno con una configuración de entrada y salida en forma de “L”, con área transversal constante y diámetro de 20mm.
- Angulo interior $\Phi = 90^\circ$.
- Angulo del arco de curvatura en el punto de intersección $\Psi = 20^\circ$.
- Las muestras son cilindros con 20 mm de diámetro y 50 mm de longitud.
- El material debe satisfacer condiciones de trabajo a temperaturas aproximadas a 500°C .
- El perímetro del dado está diseñado para evitar disipación térmica.



Marco Polo García Montes
 Rev: Dr. Gabriel Torres V.



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES
 Av. 14 de Septiembre, C. 13010 San José, Guatemala, Guatemala, C. A. Tel: (502) 233-1000
 Fax: (502) 233-1001
 E-mail: im@im.igim.edu.gt
 Web: www.im.igim.edu.gt

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

<COMPANY NAME>
 Instituto de Investigaciones en Materiales

3.2 Proceso ECAC

En la figura 3.1 se muestra un esquema para llevar a cabo el proceso de extrusión en canal angular constante a temperaturas elevadas. El dado alcanza las temperaturas requeridas mediante un sistema de resistencias conectadas en paralelo y se inserta un termopar dentro de un barreno horizontal a 5mm del canal de salida para controlar la temperatura. La temperatura fue monitoreada continuamente y controlada en $\pm 6^\circ$ durante cada uno de los pasos de extrusión.

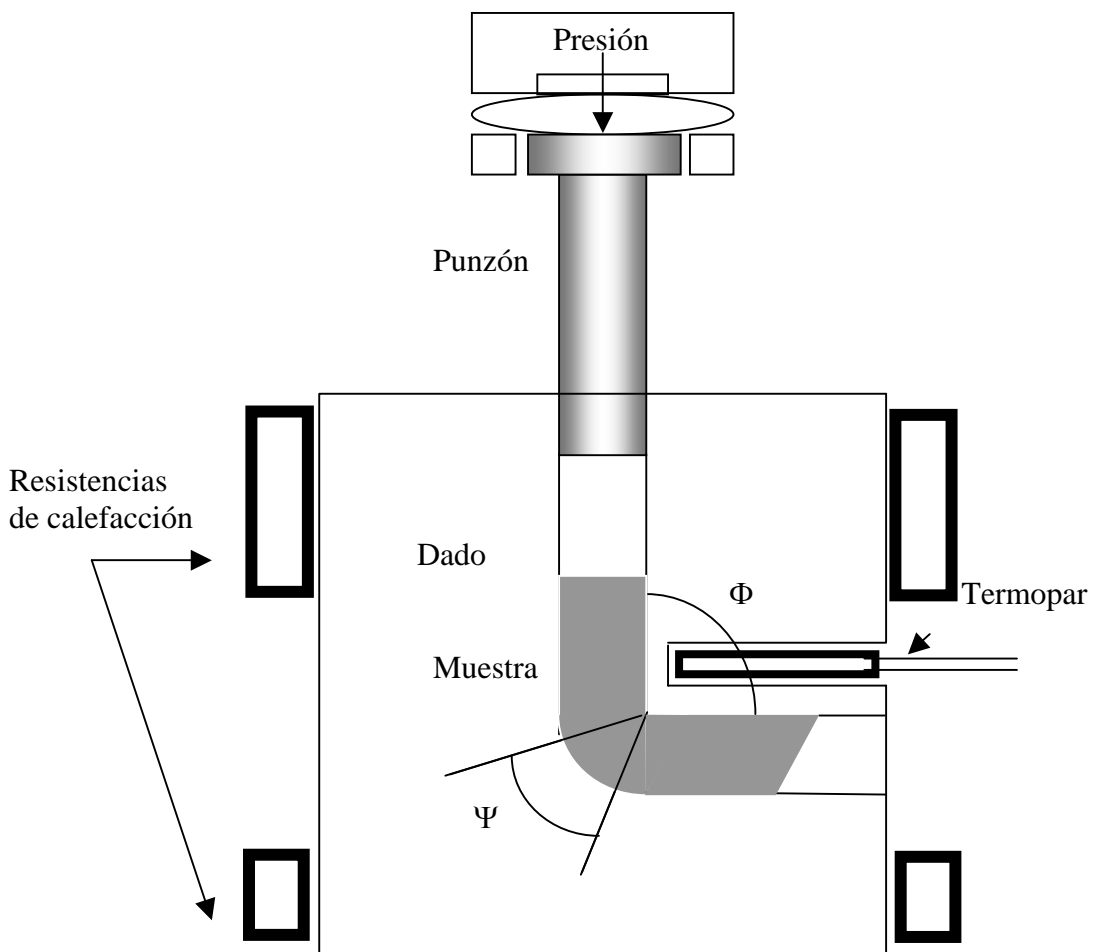


Figura 3.1. Ilustración esquemática para el proceso ECAC a altas temperaturas

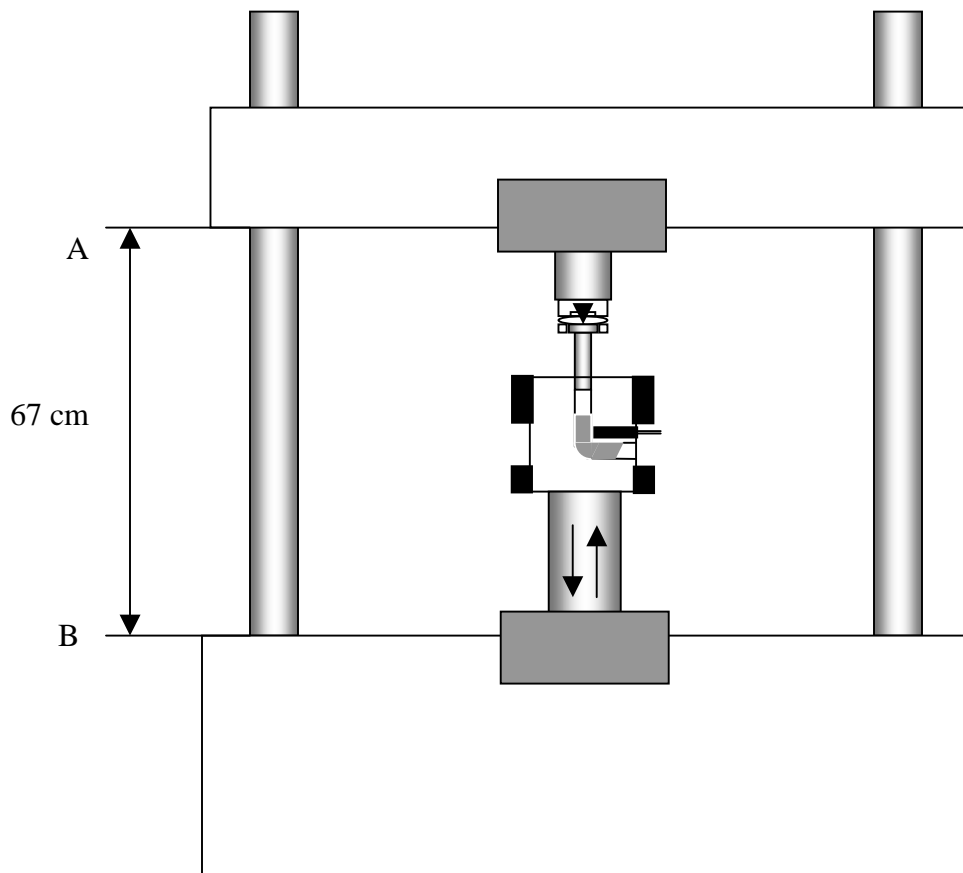


Figura 3.2. Esquema de la máquina de compresión Instron® modelo 8802 con el sistema de ECAC instalado

En la figura 3.2 puede apreciarse un esquema del sistema de extrusión en canal angular constante adaptado a una máquina universal Instron® modelo 8802. Los planos del diseño para ECAC mostrados de la página 29 a la página 33, que incluyen la cámara de extrusión desde dos perspectivas, el sistema de sujeción y adaptación, así como el punzón pueden emplearse en la Instron® 8802 cuando la distancia $AB = 670$ mm en la figura 3.2.

Una vez que se tuvo el diseño para ECAC, se fabricó un dado extrusor con acero H13, con las dimensiones del plano 1 de la página 29, las cuales fueron: 90 mm de diámetro por 90 mm de longitud, el cual contiene un canal de configuración en forma de “L”, con un ángulo interior (Φ) de 90° y con el ángulo subtendido por un arco de curvatura en el

punto de intersección (Ψ) de 20° para muestras cilíndricas de 20 mm de diámetro. En la figura 3.4 se puede apreciar el montaje experimental mientras se lleva a cabo el proceso ECAC. Las consideraciones de diseño están basados en un sistema experimental de una sola pieza, que facilita el proceso de fabricación, adaptación y ensamble en comparación con extrusores convencionales que son de 2 a 4 piezas. ^[2,5,6]

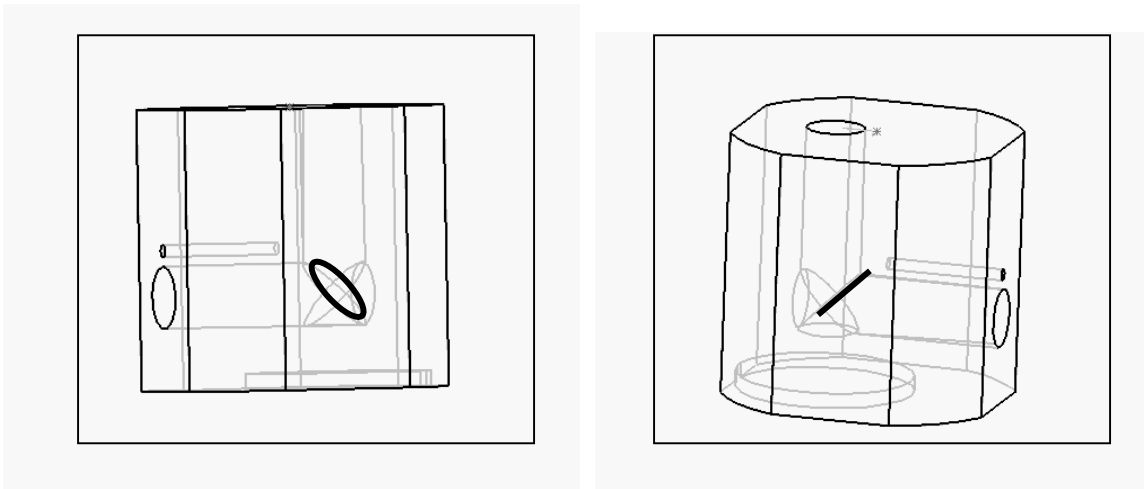


Figura 3.3. Plano de máximo esfuerzo cortante en la intersección de los canales de entrada y de salida en el esquema tridimensional del dado para ECAC diseñado en el IIM, UNAM.

En la figura 3.3 se aprecia desde dos diferentes perspectivas el plano de máximo esfuerzo cortante, donde cada vez que el material es procesado, sufre una deformación por deslizamiento puro.

El sistema de extrusión se adaptó a una máquina universal Instron® modelo 8802 conectada a un sistema de adquisición de datos. La aleación en estudio está constituida por Zn- 22% Al- 2% Cu (Zinalco ®) con materiales de grado comercial. La aleación fue maquinada en cilindros de 20 mm de diámetro y 50 mm de longitud.

En una primera fase, el proceso de ECAC se llevó a cabo a una temperatura de 240°C . La velocidad de presión del cabezal fue de 1 mm/min. Cada muestra fue procesada a través del dado sólo una vez. El lubricante utilizado fue grasa de silicón para altas temperaturas marca Molikote. En una segunda fase experimental, el proceso de ECAC se llevó a cabo

a una temperatura de 300°C. La velocidad de presión del cabezal fue de 1 mm/min. Cada muestra fue procesada a través del dado tres veces siguiendo la ruta de extrusión Bc. Se utilizó el mismo lubricante.

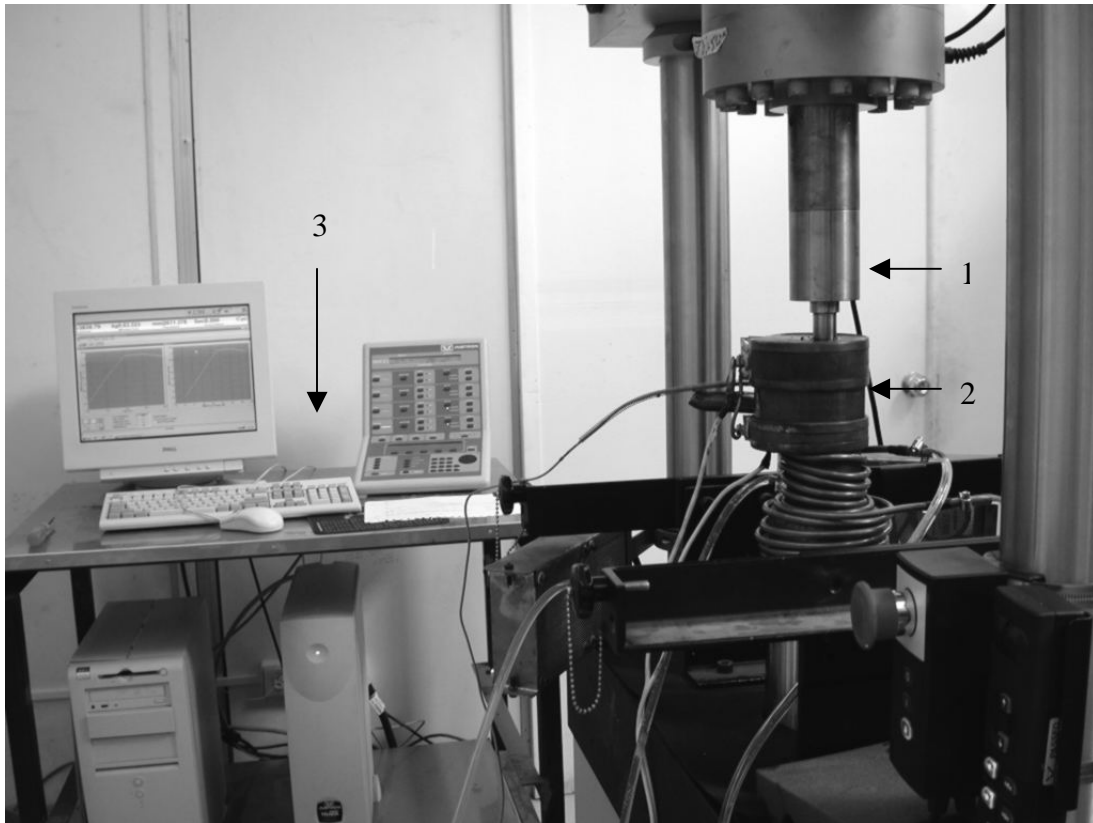


Figura 3.4. Proceso ECAC. 1: Presión sobre la muestra; 2: Cámara de extrusión con zinalco® y 3: Sistema de adquisición de datos

En la figura 3.4 aparece el sistema de ECAC desarrollado en el IIM, UNAM mientras ocurre la extrusión de la muestra de Zn- 22% Al- 2% Cu. En la imagen, se señala con el número 1, la parte del equipo que ejerce presión sobre la muestra; con el número 2 se señala la cámara de extrusión con una sección de la muestra procesada que se encuentra ya en el exterior. El sistema de ajuste y adquisición de datos se señala con el número 3.

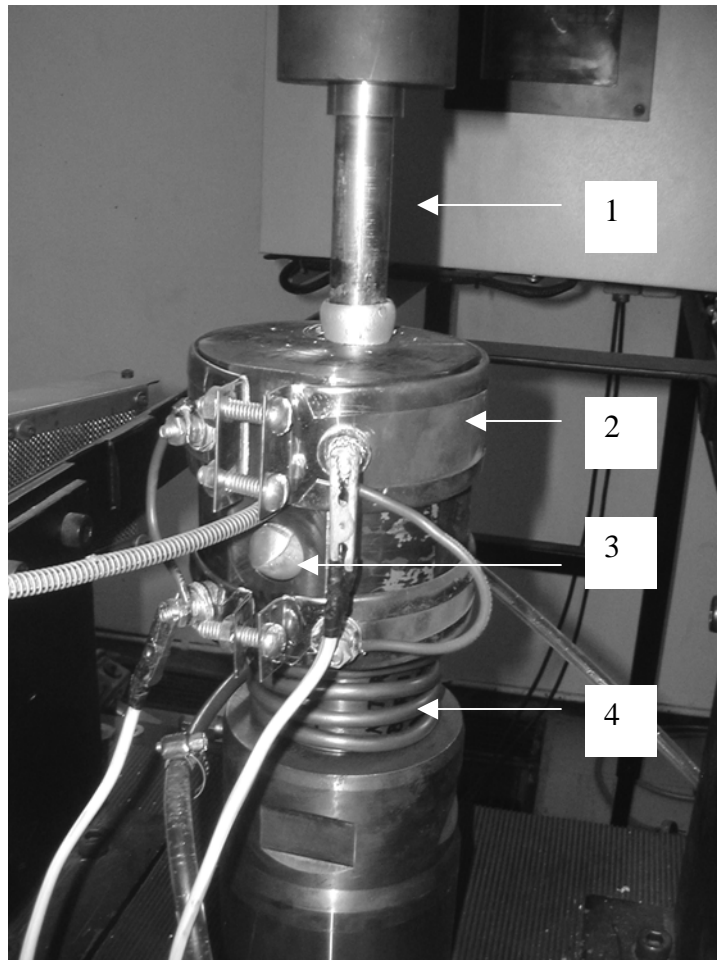


Figura 3.5. Proceso ECAC. 1: Punzón; 2: Dado de extrusión y sistema de calefacción; 3: Barra de Zinalco® a la salida del proceso de extrusión; 4: Sistema de enfriamiento.

En la figura 3.5 se aprecia un acercamiento del sistema de ECAC desarrollado en el IIM, UNAM mientras ocurre la extrusión de la muestra de Zn- 22% Al- 2% Cu. En la imagen, se señala con el número 1, la parte del equipo que ejerce presión sobre la muestra; con el número 2 se señala el dado de extrusión y las resistencias de calefacción; con el número 3 se señala la muestra procesada saliendo del dado de extrusión. El sistema de enfriamiento se señala con el número 4.

3.3 Análisis a las muestras procesadas mediante ECAC

Microscopía electrónica

Con el propósito de medir (establecer de manera cuantitativa) las modificaciones a la microestructura, así como al tamaño de grano de las probetas de zinalco® según las condiciones de procesado por extrusión en canal angular constante se empleó la microscopía electrónica de barrido.

El análisis metalográfico se realizó mediante un microscopio electrónico de barrido Leica® modelo Stereoscan 440® con detector QBSD. Las microestructuras fueron analizadas en secciones transversales normales a la dirección de salida del extrusor .

Rayos X

Para determinar posibles cambios de fase en el material procesado se realizaron análisis de rayos x. El análisis fue realizado en secciones transversales normales a la dirección de salida del extrusor, con un equipo marca Broker® AXS D8 Advance® del IIM, UNAM. El software empleado fue el Diffrac Plus Release 2000® con una base de datos PCDFWIN®. El equipo cuenta con un tubo de cobre, la longitud de onda $\lambda = 1.5406$ que corresponde a Cu $K\alpha$. La velocidad de barrido = $1^\circ (2\theta) / \text{min}$ a 35KV y 30 mA.

Pruebas de dureza

Para medir la dureza del zinalco extrudido a través del canal angular constante, se realizaron pruebas de dureza, las cuales se llevaron a cabo con un durómetro MFD – 9642 modelo 3R Misawa Seiki Seisakushi® en el laboratorio de Pruebas mecánicas del IIM, UNAM. Las pruebas que se realizaron fueron de dureza Rockwell B, (HR_B), con esfera de 1/16” con un tiempo de penetración de 30 segundos y con una carga de 100 Kg.

Capítulo IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES; ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Una vez que fue implementado el sistema de experimentación para realizar la extrusión en canal angular constante, se procesó el material mediante dicha técnica y posteriormente se sometió al material resultante a análisis de microscopía electrónica de barrido, rayos x, así como pruebas de dureza. Los resultados que arrojaron éstas pruebas y la discusión correspondiente se presentan a continuación:

Proceso ECAC

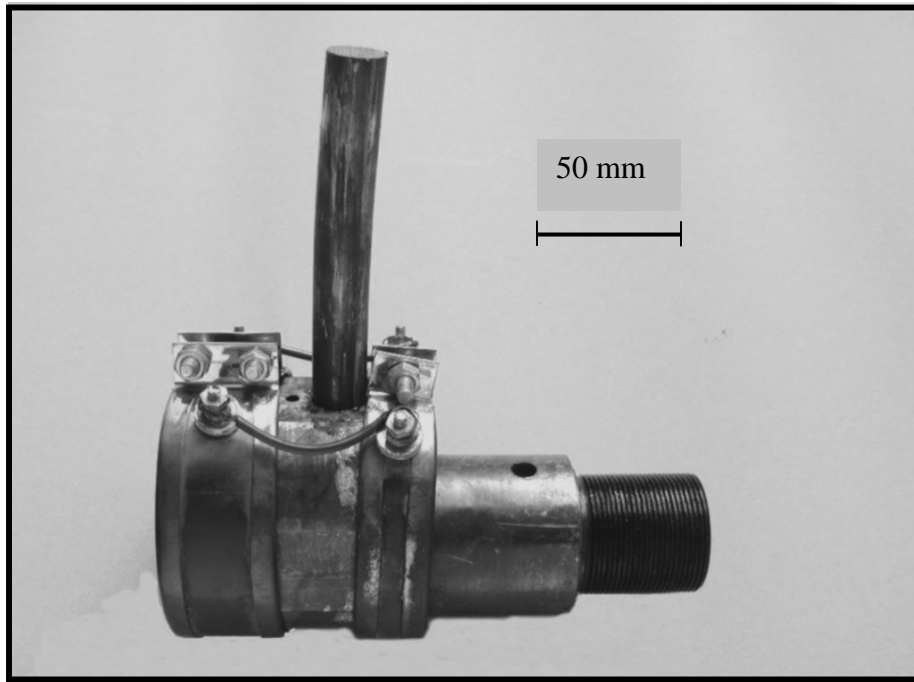


Figura 4.1. Barra de Zn – 22% Al – 2% Cu recién procesada mediante el sistema de ECAC diseñado y fabricado en el IIM.

En la figura 4.1 se aprecia el dispositivo de extrusión en canal angular constante desarrollado en el IIM de la UNAM, que aparece desmontado de la máquina de compresión. La probeta de Zn- 22% Al- 2% Cu que puede verse en la imagen, ha sido procesada y las barras que originalmente son introducidas al dado de extrusión con dimensiones de 50 mm de longitud, han soldado por difusión dando origen a barras con

la longitud deseada. Con respecto al diseño del equipo, la cámara de extrusión tiene ventajas con respecto a otros diseños, dado que presenta una gran adaptabilidad de fijación a equipos convencionales de prensas de bajo tonelaje y a máquinas de ensayos mecánicos, además de que el sistema de calentamiento puede trabajar a temperaturas de 500°C alcanzando en un tiempo de 10 minutos la temperatura de trabajo.

Datos de la extrusión

En la figura 4.2, se puede ver la gráfica de esfuerzo real (σ) vs deformación real en compresión (ϵ) para el sistema Zn- 22% Al- 2% Cu durante el proceso de ECAC llevado a cabo a 240° C. Los datos recolectados se encuentran en términos de carga (N) para ejercer presión sobre la muestra en el interior del dado de extrusión y en términos de su longitud de desplazamiento o avance del punzón, L al interior de la cámara hasta la salida de la muestra en su totalidad.

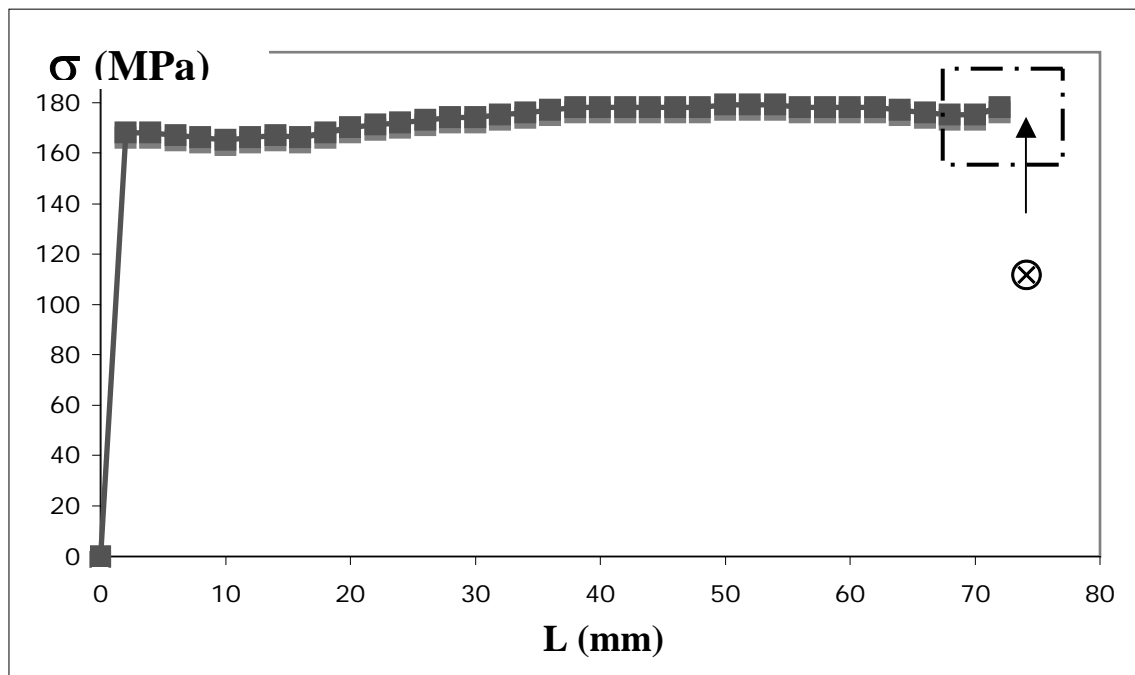


Figura 4.2. Esfuerzo real (σ) vs desplazamiento (L) en extrusión para el sistema Zn- 22% Al- 2% Cu durante el proceso de ECAC a 240° C

Una vez que se tienen los datos correspondientes a cada paso de extrusión, se definen los valores de esfuerzo real (σ) y desplazamiento del punzón (L) de la probeta para la elaboración de las gráficas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6. La curva obtenida (figura 4.2) presenta un comportamiento elástoplástico, hasta llegar a un punto donde los valores de esfuerzo permanecen cuasi constantes y donde no habrá falla en la región marcada como \otimes debido a que el dado no permite el embarrilamiento de la muestra. La curva termina cuando la muestra ha sido extrudida en su totalidad.

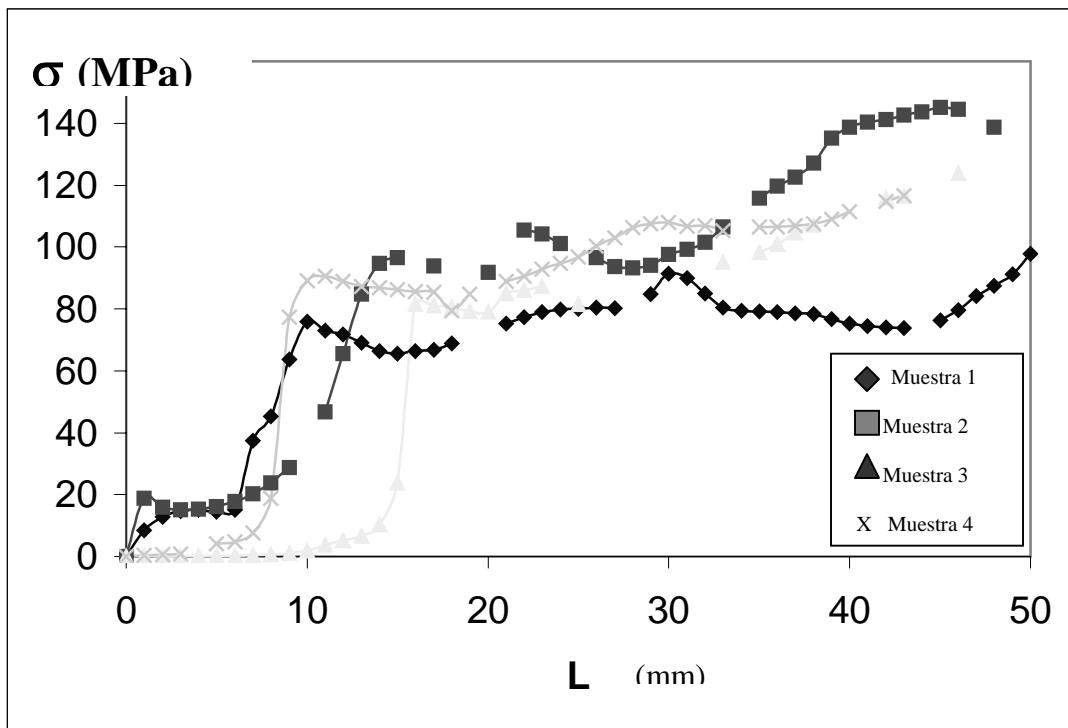


Figura 4.3. Esfuerzo real (σ) vs desplazamiento (ε) en extrusión para el sistema Zn- 22%Al- 2%Cu durante el proceso de ECAC a 300° C. Primer paso de extrusión.

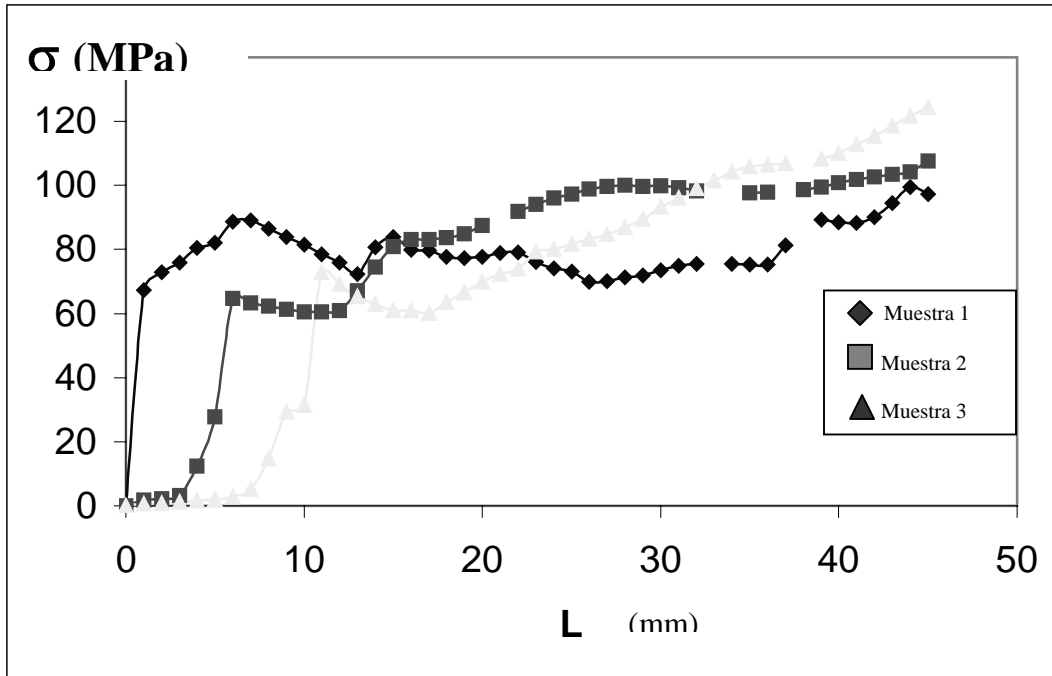


Figura 4.4. Esfuerzo real (σ) vs desplazamiento (L) en extrusión para el sistema Zn- 22%Al-2%Cu durante el proceso de ECAC a 300° C. Segundo paso de extrusión.

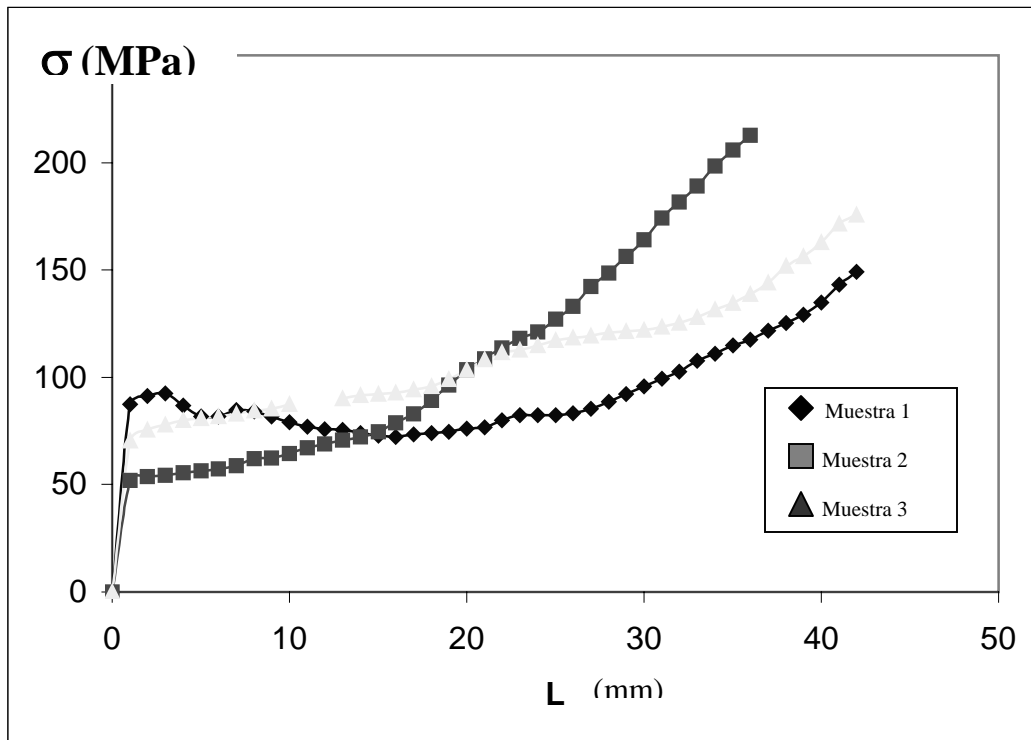


Figura 4.5. Esfuerzo real (σ) vs desplazamiento (L) en compresión para el sistema Zn- 22%Al-2%Cu durante el proceso de ECAC a 300° C. Tercer paso de extrusión.

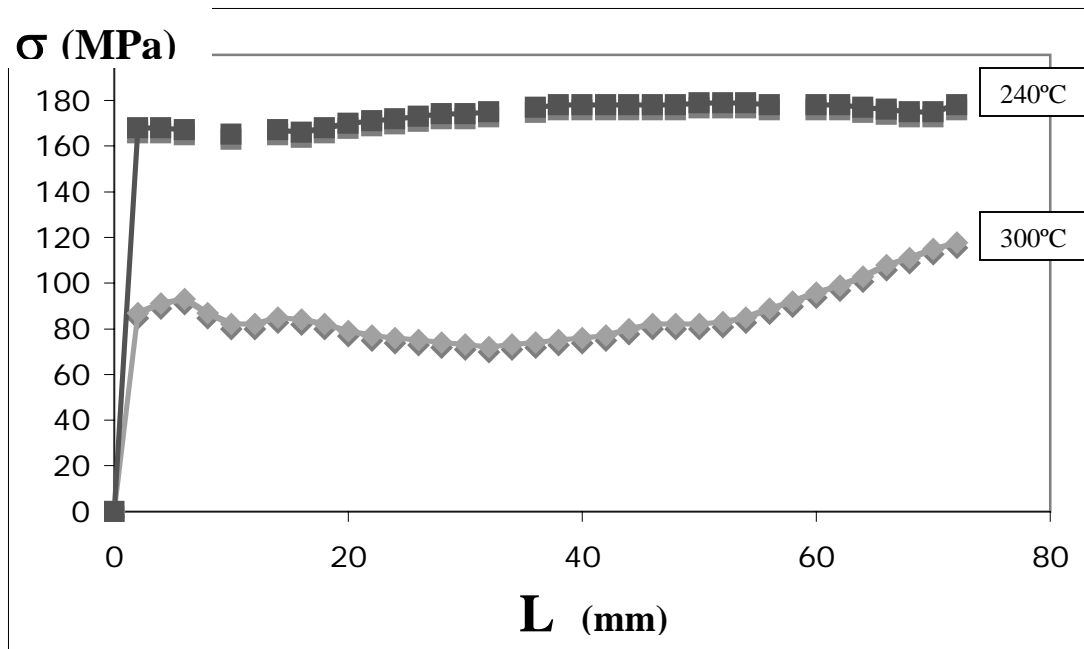


Figura 4.6. Esfuerzo real (σ) vs desplazamiento (L) en extrusión a diferentes temperaturas para el sistema Zn- 22%Al- 2%Cu durante el proceso de ECAC. Un paso de extrusión.

Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 presentan curvas experimentales para zinalco® procesado mediante ECAC en donde puede verse que los valores de esfuerzo requeridos pueden variar según sean las condiciones de procesado, tal como la temperatura.

En la figura 4.6 aparece la gráfica de esfuerzo real (σ) en función de la deformación real en compresión (ϵ) con dos diferentes temperaturas de proceso para el zinalco®. Resulta notoria la diferencia de esfuerzos requeridos para extrudir el material. Los valores de esfuerzo bajan con un aumento de temperatura.

En las figuras 4.7, 4.8 y 4.9, se grafica la energía requerida en función del desplazamiento durante cada paso de extrusión de zinalco®. En la figura 4.10 se observa el promedio de energía requerida, mostrándose un endurecimiento notable para el tercer paso de extrusión y a pesar de llevar a cabo el proceso a 300° C.

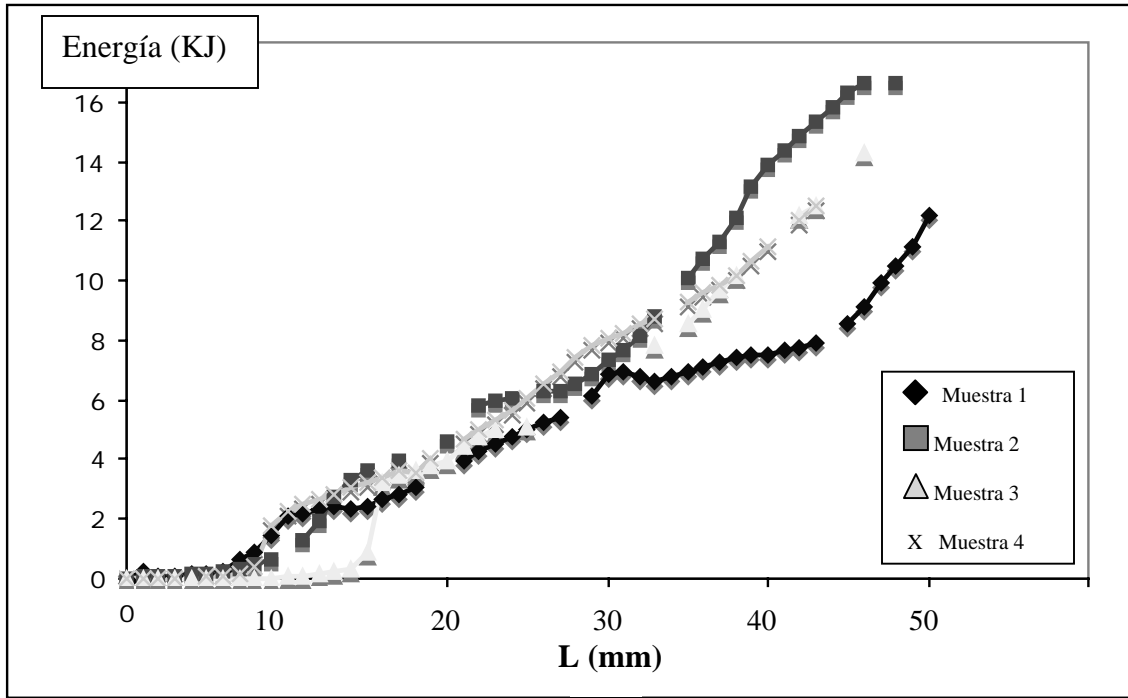


Figura 4.7. Gráfica de energía vs desplazamiento para el zinalco®. Pasos de extrusión: 1

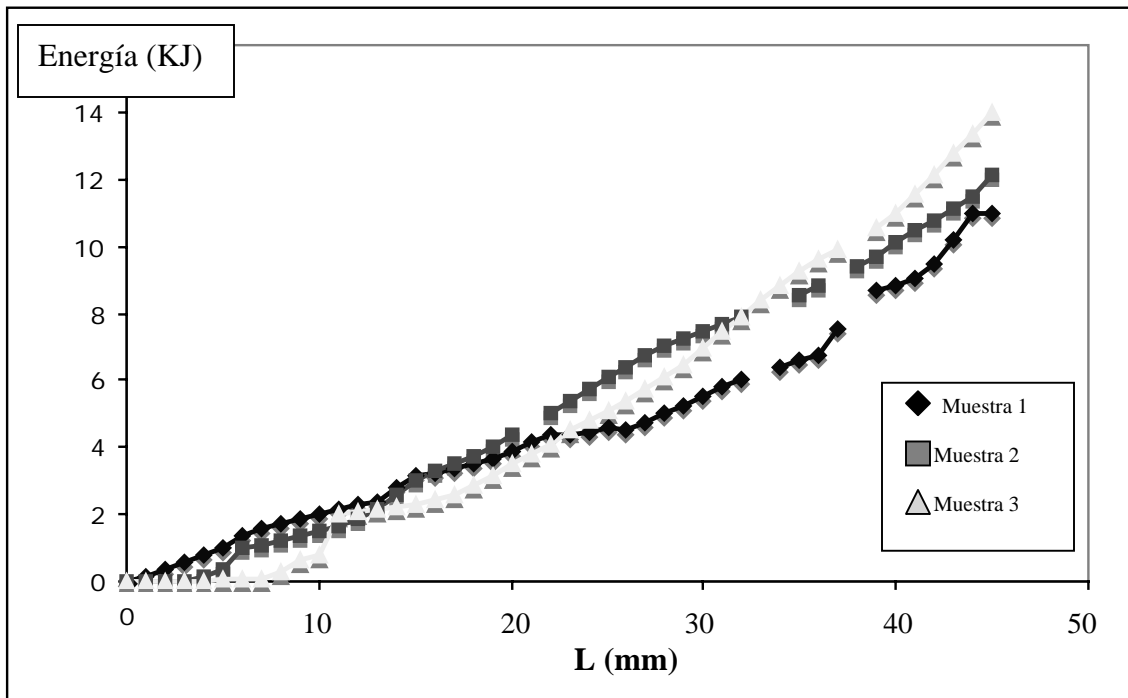


Figura 4.8. Gráfica de energía vs desplazamiento para el zinalco®. Pasos de extrusión: 2

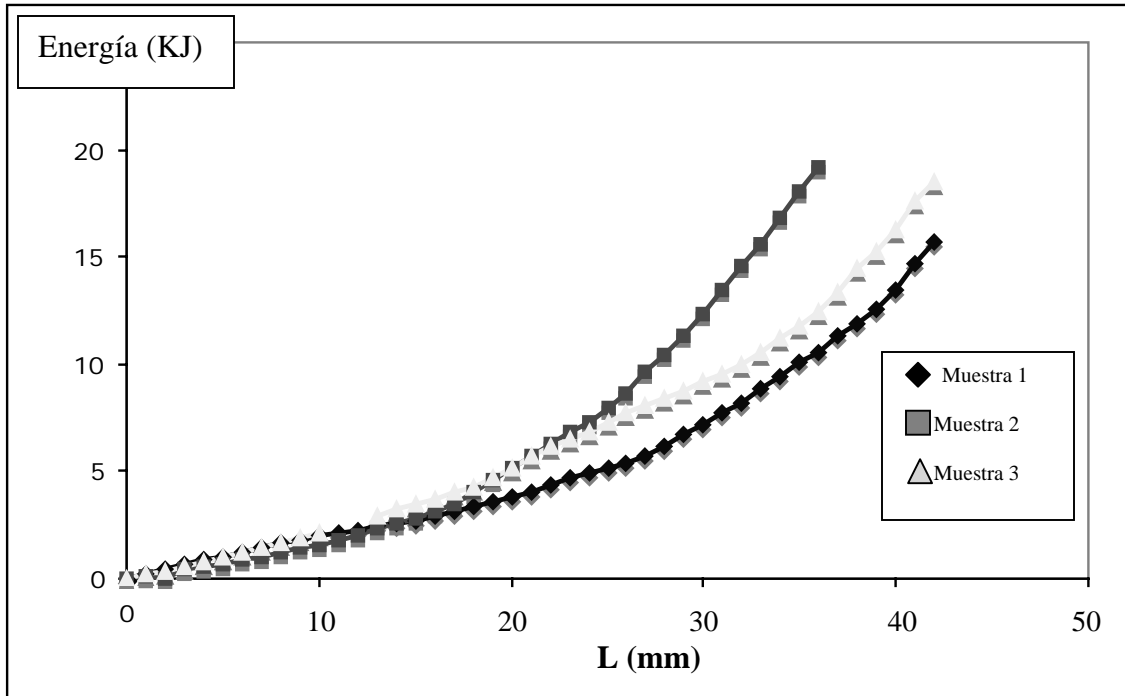


Figura 4.9. Gráfica de energía vs desplazamiento para el zinalco®. Pasos de extrusión: 3

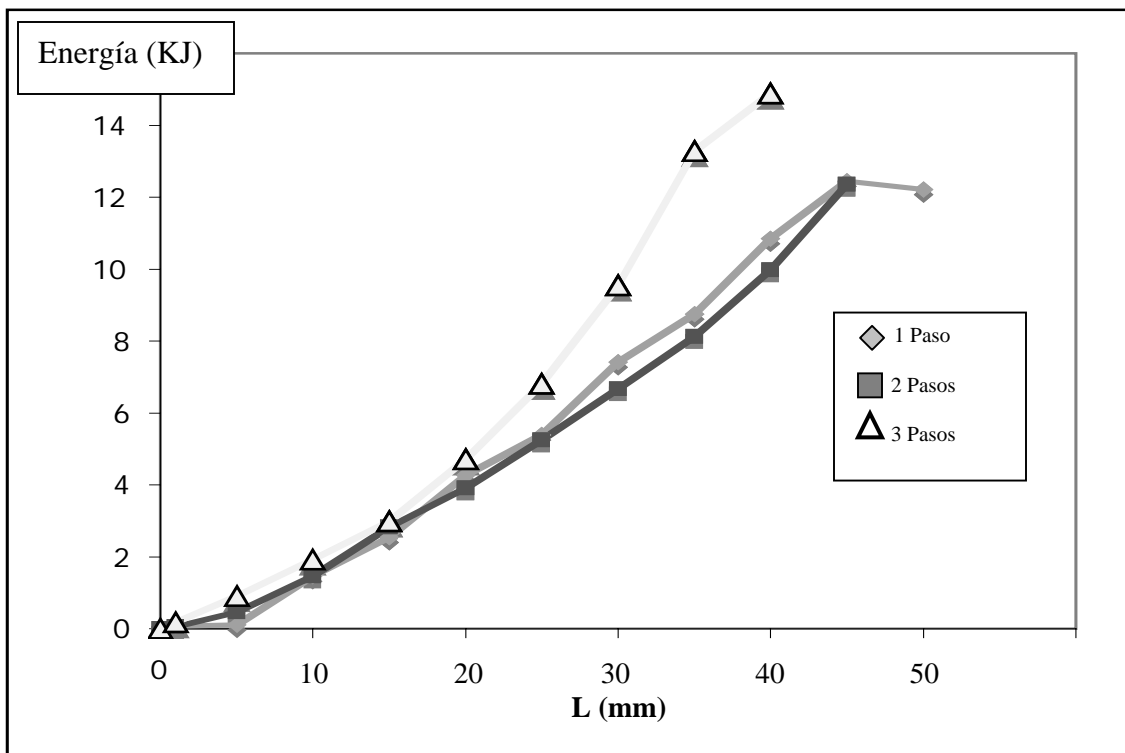


Figura 4.10. Gráfica de promedios de energía de cada paso de extrusión vs desplazamiento para el zinalco®.

Observaciones microestructurales mediante microscopía electrónica de barrido

El análisis de la microestructura resultante del material empleado se realizó mediante microscopía electrónica de barrido. Después de someter a un material a un proceso de deformación plástica severa, se anticipa la idea de que su microestructura debió sufrir cambios significativos; cambios que representan potencialmente comportamientos superplásticos después del proceso. En las páginas siguientes se presentan los cambios graduales del zinalco® a partir de la estructura de fundición hasta la microestructura alcanzada mediante pasos de extrusión múltiples en canal angular constante.

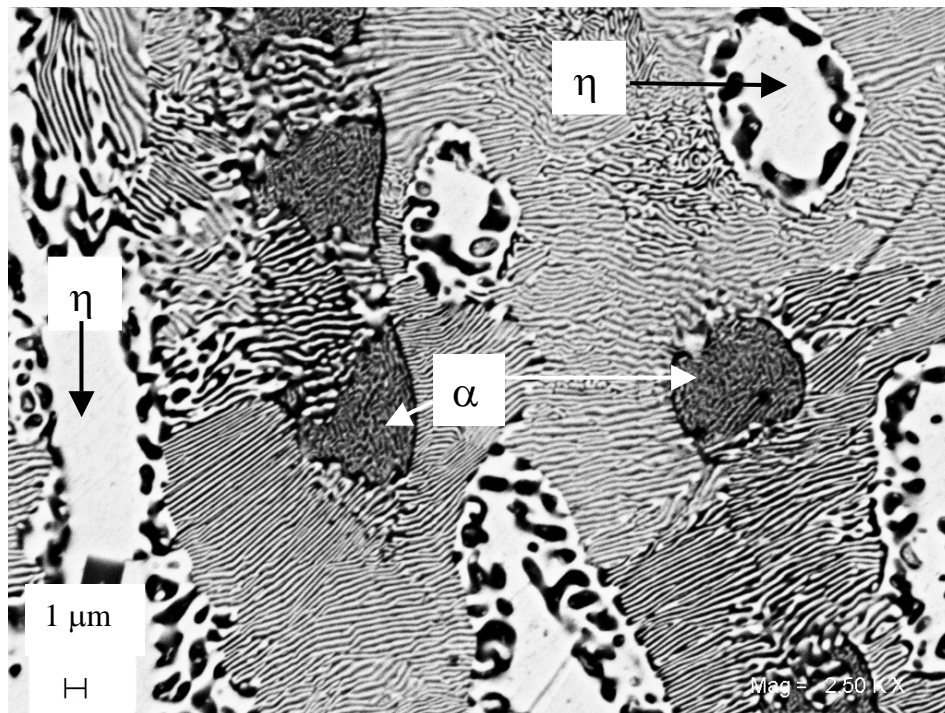


Figura 4.11. Metalografía en SEM. Estructura de fundición de la aleación Zn- 22%Al- 2%Cu antes del proceso ECAC. Amplificación, 2500 X

En la figura 4.11 puede observarse la microestructura de fundición del zinalco®. La fase η corresponde al zinc, mientras que las fase oscura, α , corresponde al aluminio. En las metalografías siguientes se presentan muestras de zinalco® procesado mediante ECAC. La dirección de deslizamiento, (DD) se representa en la esquina superior izquierda con una flecha blanca.

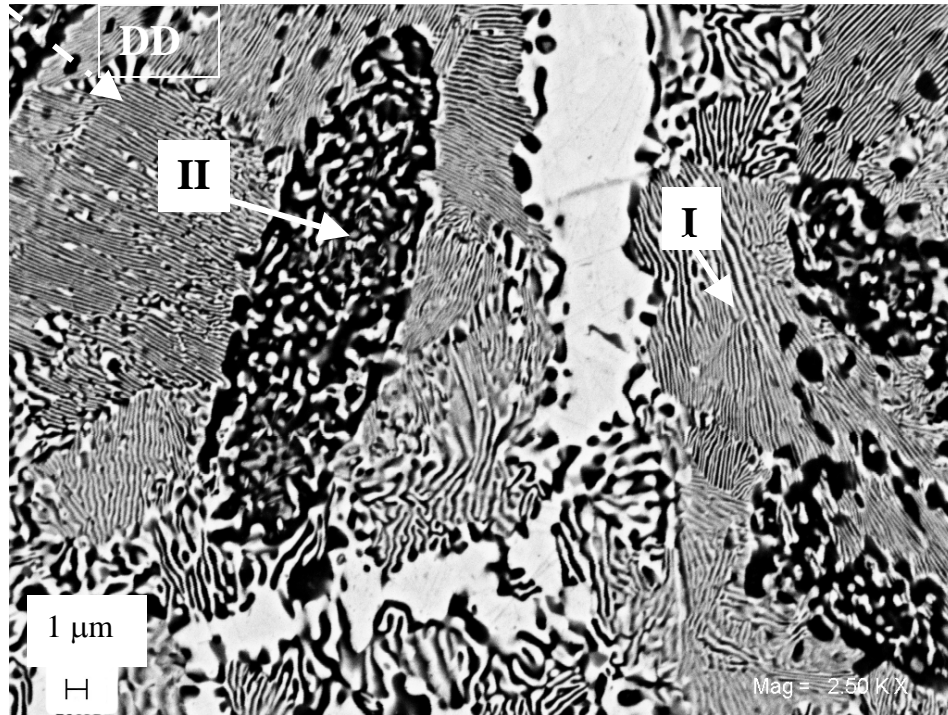


Figura 4.12. Metalografía en SEM. Zona 1 de una barra de Zn- 22%Al- 2%Cu procesado mediante ECAC a 240°C. Pasos de extrusión: 1. Amplificación, 2500 X.

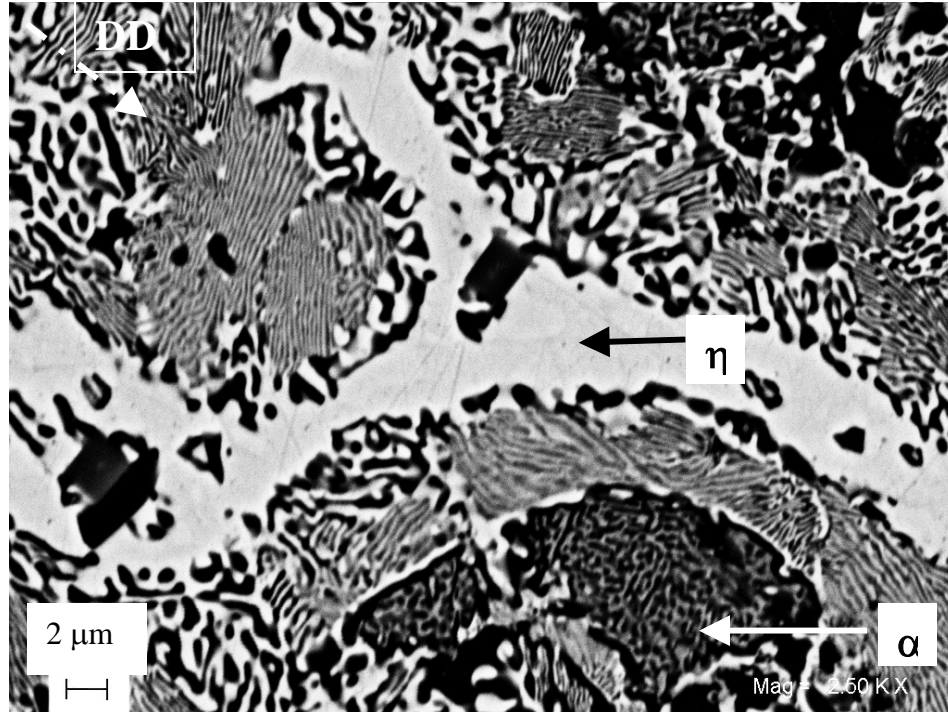


Figura 4.13. Metalografía en SEM. Zona 2 de una barra de Zn- 22%Al- 2%Cu procesado mediante ECAC a 240°C. Pasos de extrusión: 1. Amplificación, 2500 X.

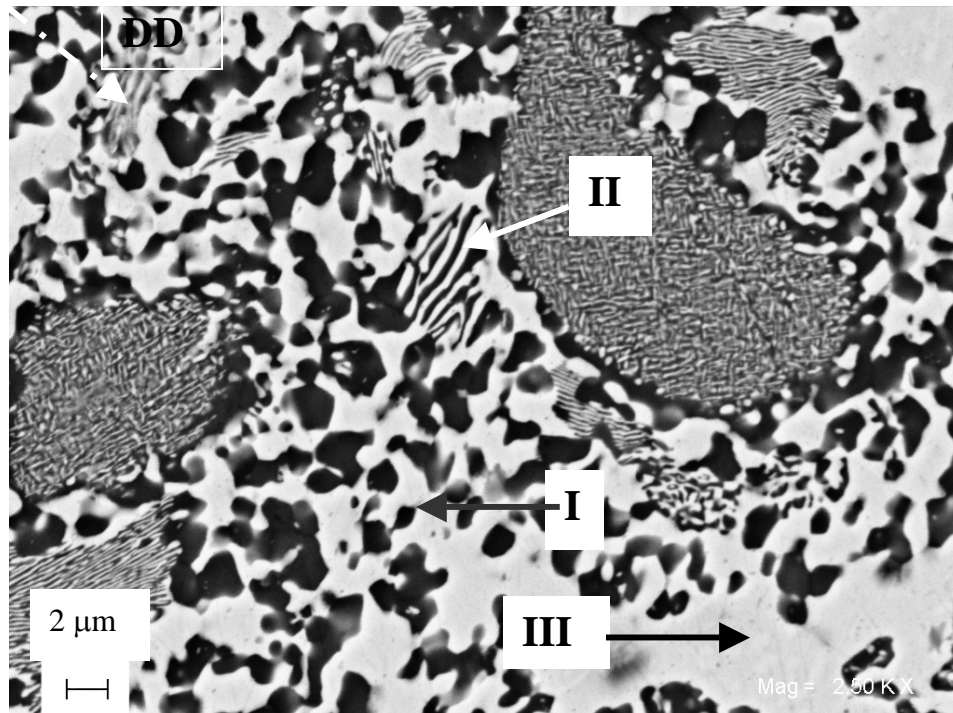


Figura 4.14. Metalografía en SEM. Zona 3 de una barra de Zn- 22%Al- 2%Cu después del proceso ECAC a 240°C. Pasos de extrusión:1. Amplificación, 2500 X.

En la figura 4.11 se aprecia la estructura dendrítica de fundición del zinalco® antes del proceso de extrusión en canal angular constante. Las figuras 4.12, 4.13 y 4.14, pertenecen a diferentes zonas de una muestra procesada mediante ECAC a 240°. El esquema de la figura 4.15 define las zonas donde se realizó el análisis microscópico.

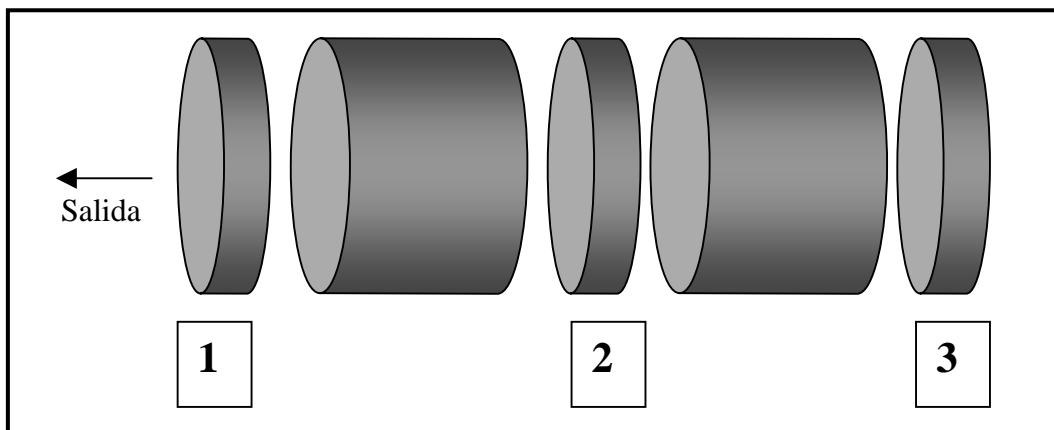


Figura 4.15. Barra de 50 mm de Zinalco después del proceso ECAC; la zonas de extrusión 1, 2 y 3 son la punta; la zona media y la zaga de la barra respectivamente.

Al observar las figuras 4.12, 4.13 y 4.14, se aprecia la evolución gradual en el rompimiento de la estructura dendrítica con una marcada densidad de perlitas hasta la formación de una microestructura de grano fino. Puede apreciarse también la disminución de tamaño de grano así como el ancho de placa perlítica en distintas zonas de la muestra. De manera cuantitativa, el tamaño de grano en la punta de la barra (figura 4.12), es mayor al tamaño de grano observado en las zonas subsecuentes (Figuras 4.13 y 4.14), donde la reducción aproximada es del 35% con respecto a la punta debido a que el proceso de deformación plástica severa no causa efecto sobre esa zona de la muestra. Sin embargo, el efecto de la temperatura en la extrusión ayuda a romper con las estructuras perlíticas en el menor número de pasadas. Una inspección más detallada de la evolución microestructural se observa en la figura 4.12, donde se aprecian dos fases determinadas por I como una región de fase ($\alpha + \eta$) y II como una región rica en aluminio (zonas oscuras).

En la figura 4.13, se muestra la existencia de una mezcla de fases, una de ellas rica en fase α , rica en aluminio (zona oscura) y otra región de fase η , rica en zinc, (zona brillante). La figura 4.14 muestra la presencia de grano fino (I), una densidad de área significativamente menor de estructuras perlíticas (II) y finalmente se pueden observar fases ricas en zinc (III).

En la figura 4.16.B se aprecia la evolución en la disminución de tamaño de grano de las muestras de acuerdo a las diferentes zonas de la barra extrudida; de igual forma se comparan en la figura 4.16.A los cambios en el ancho de las placas perlíticas en distintas zonas de la muestra mediante deformación plástica severa.

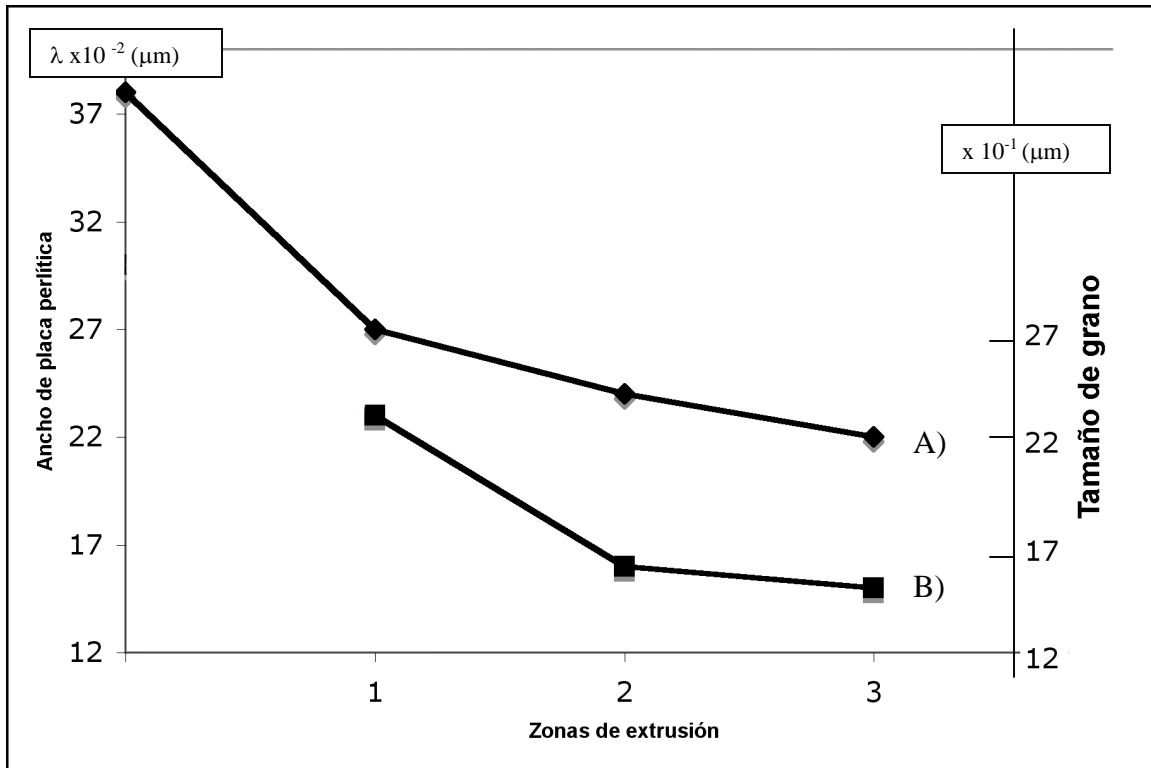


Figura 4.16. (A) Reducción del promedio del ancho de placa perlítica y B) Reducción del promedio de tamaño de grano en tres zonas de una barra de zinalco® después del proceso ECAC a 240°C y un sólo paso de extrusión.

El proceso de refinamiento de grano mediante ECAC en la aleación bajo estudio, está relacionado con una transformación de estructura dendrítica de fundición a una estructura de grano fino con una mezcla de fase que no se rompe en un solo paso de extrusión dadas las condiciones de temperatura y deformación plástica. Dado que el refinamiento de grano mediante ECAC depende del índice de recuperación, el refinamiento se mejora cuando éste índice es reducido al alear el material, como es la adición de cobre en el sistema zinc – aluminio.

En la figura 4.17, se aprecia de forma explícita la evolución en la transformación de la microestructura del material después de tres pasos de extrusión con condiciones de temperatura y orientación de deformación fijas; 300° y ruta de procesado Bc. Las ampliaciones también permiten apreciar los cambios graduales en la microestructura.

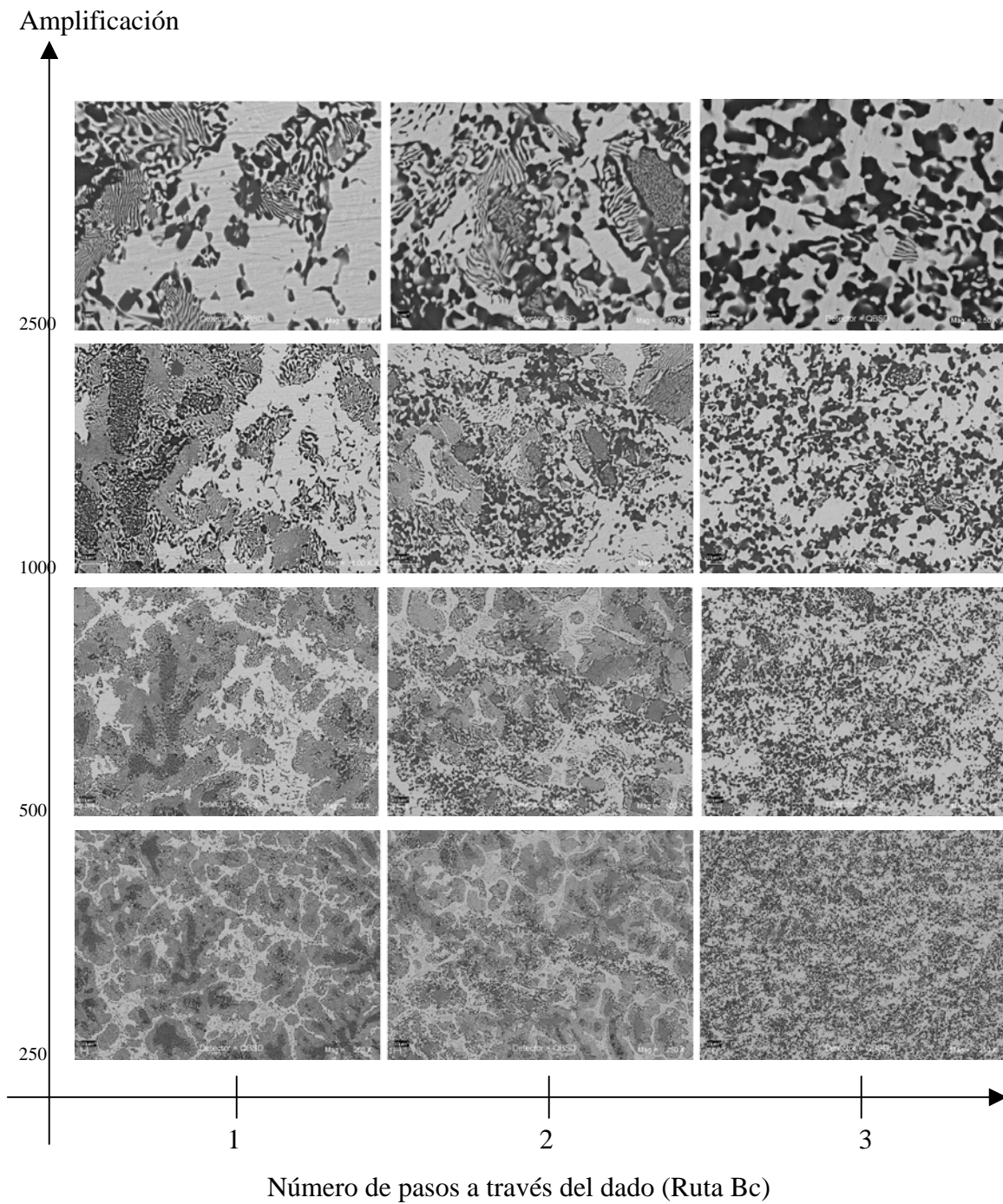


Figura 4.17. Metalografías presentadas en forma matricial. En las filas: amplificación microscópica. En las columnas: número de pasos de extrusión mediante ECAC a 300°C.

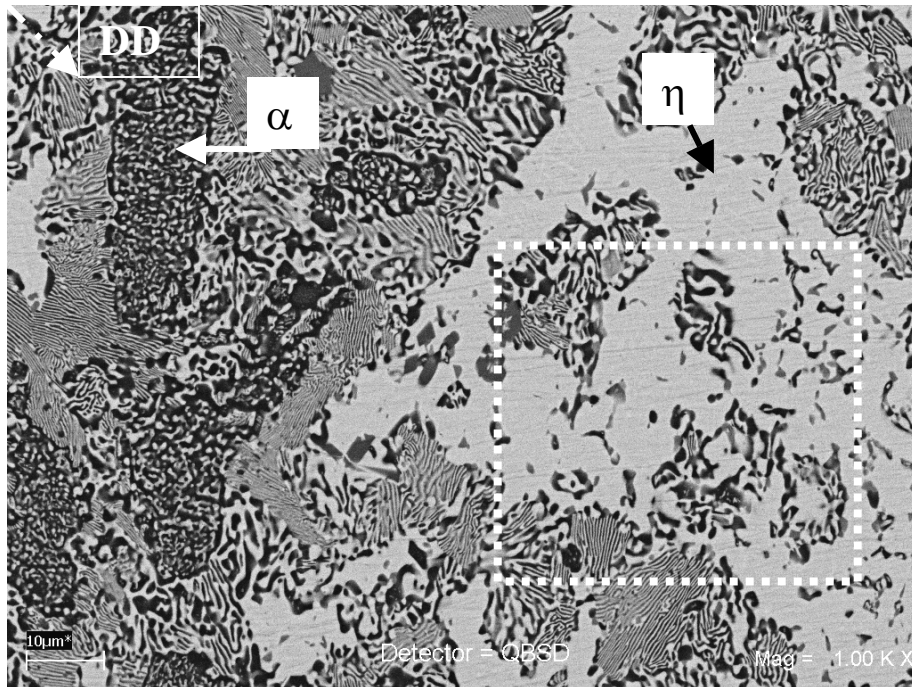


Figura 4.18. Metalografía en SEM. Zn- 22%Al- 2%Cu procesado mediante ECAC a 300° C.
Pasos de extrusión: 1. Amplificación, 1000 X. DD: dirección de deslizamiento máximo

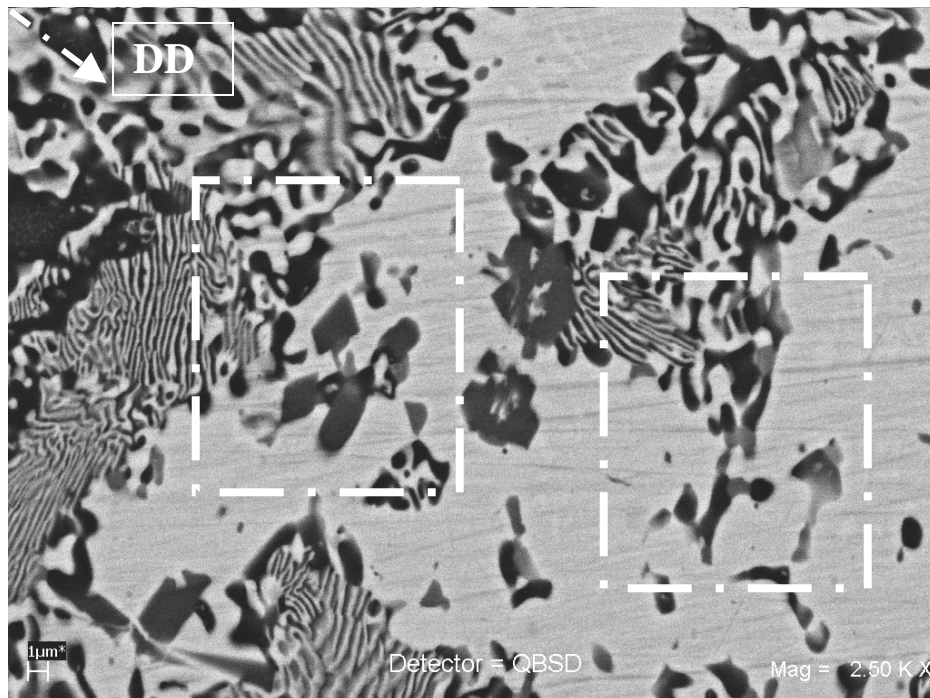


Figura 4.19. Metalografía en SEM. Zn- 22%Al- 2%Cu procesado mediante ECAC a 300° C.
Pasos de extrusión: 1. Amplificación, 2500 X. DD: dirección de deslizamiento máximo

En las figuras 4.18 y 4.19 se aprecian las metalografías en barrido del Zn- 22%Al- 2%Cu procesado mediante ECAC a 300°C y con un solo paso de extrusión. Las ampliaciones son de 1000 X y 2500 X respectivamente.

En la figura 4.18 se señalan las regiones α y η , fuera del recuadro, aparecen regiones donde la microestructura no ha sido afectada por el proceso después de un paso a través del dado, sin embargo, dentro del recuadro se aprecian zonas del material donde la estructura de placas perlíticas se ha roto debido a la deformación plástica severa por deslizamiento impuesta mediante el proceso ECAC. Lo anterior se hace más notorio con una ampliación de 2500 X sobre la misma zona en la figura 4.19, donde la ruptura de la perlita aparece señalada en los recuadros.

Las imágenes revelan la ruptura de la estructura perlítica del material de partida hasta la formación de granos muy similares a aquellos observados en metales superplásticos,

Por medio de pasos de extrusión múltiples y siguiendo la ruta Bc, se consiguió una refinación de grano significativa, dado que la estructura de perlita ha sido rota, quedando sólo remanencias de la estructura α , señaladas como α_1 en la figura 4.20, dando lugar a una microestructura de grano fino; dicha estructura es homogénea en todas las zonas de la muestra.

En la figura 4.21, una ampliación de 2500 X sobre la misma zona de análisis, permite ver las remanencias de estructura α , también señaladas como α_1 manteniéndose la fase η como una fase continua y remanencias de estructuras perlíticas, marcadas con I.

En las figuras 4.20 y 4.21, las metalografías exhiben microestructuras totalmente diferentes a las observadas en el material de partida. Puede observarse también la obtención de una microestructura con límites de fase bien definidos, donde granos de aluminio se encuentran distribuidos dentro de la fase continua del zinc. Como se ha mencionado anteriormente, se procesó la muestra un total de 3 veces siguiendo la ruta Bc, y eso fue suficiente para establecer una microestructura homogénea en zinalco®.

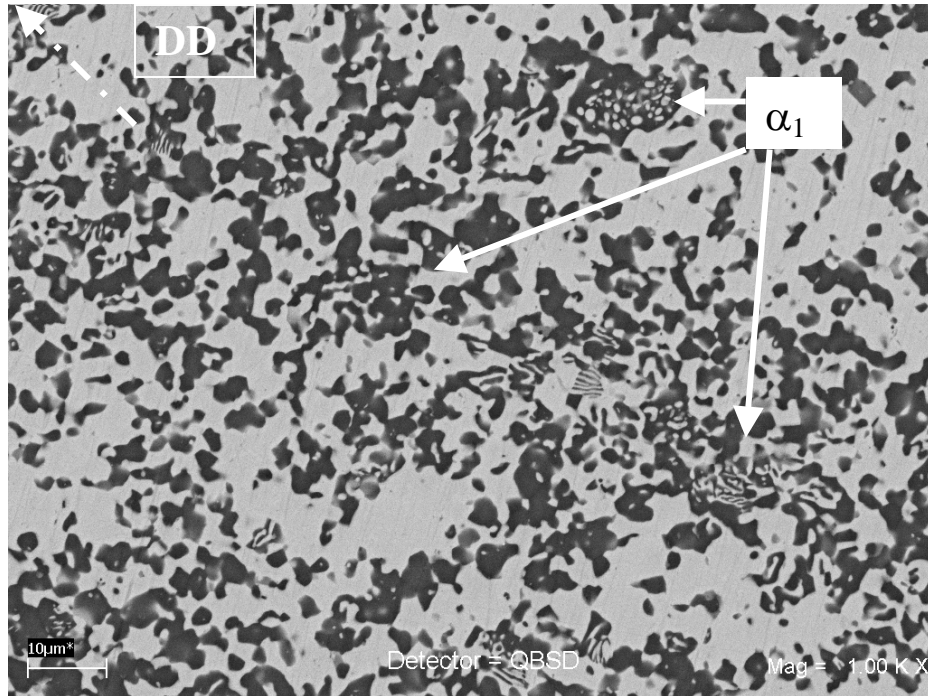


Figura 4.20. Metalografía en SEM. Zn- 22%Al- 2%Cu procesado mediante ECAC a 300°C.
Pasos de extrusión: 3. Ruta Bc. Amplificación, 1000 X. DD: dirección de deslizamiento máximo

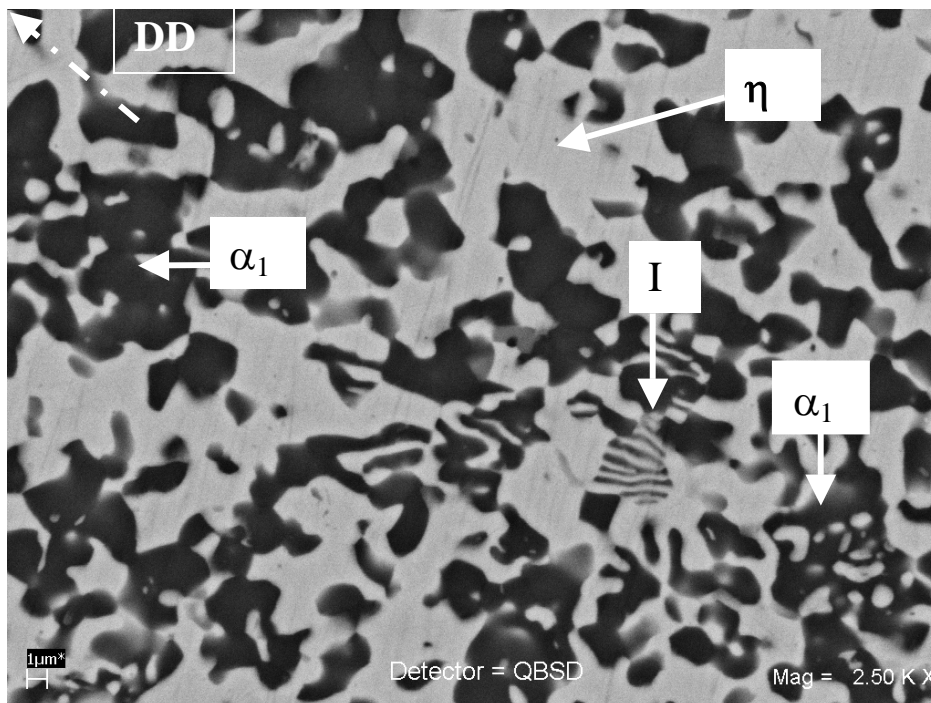


Figura 4.21. Metalografía en SEM. Zn- 22%Al- 2%Cu procesado mediante ECAC a 300°C.
Pasos de extrusión: 3. Ruta Bc. Amplificación, 2500 X. DD: dirección de deslizamiento máximo

Amplificación

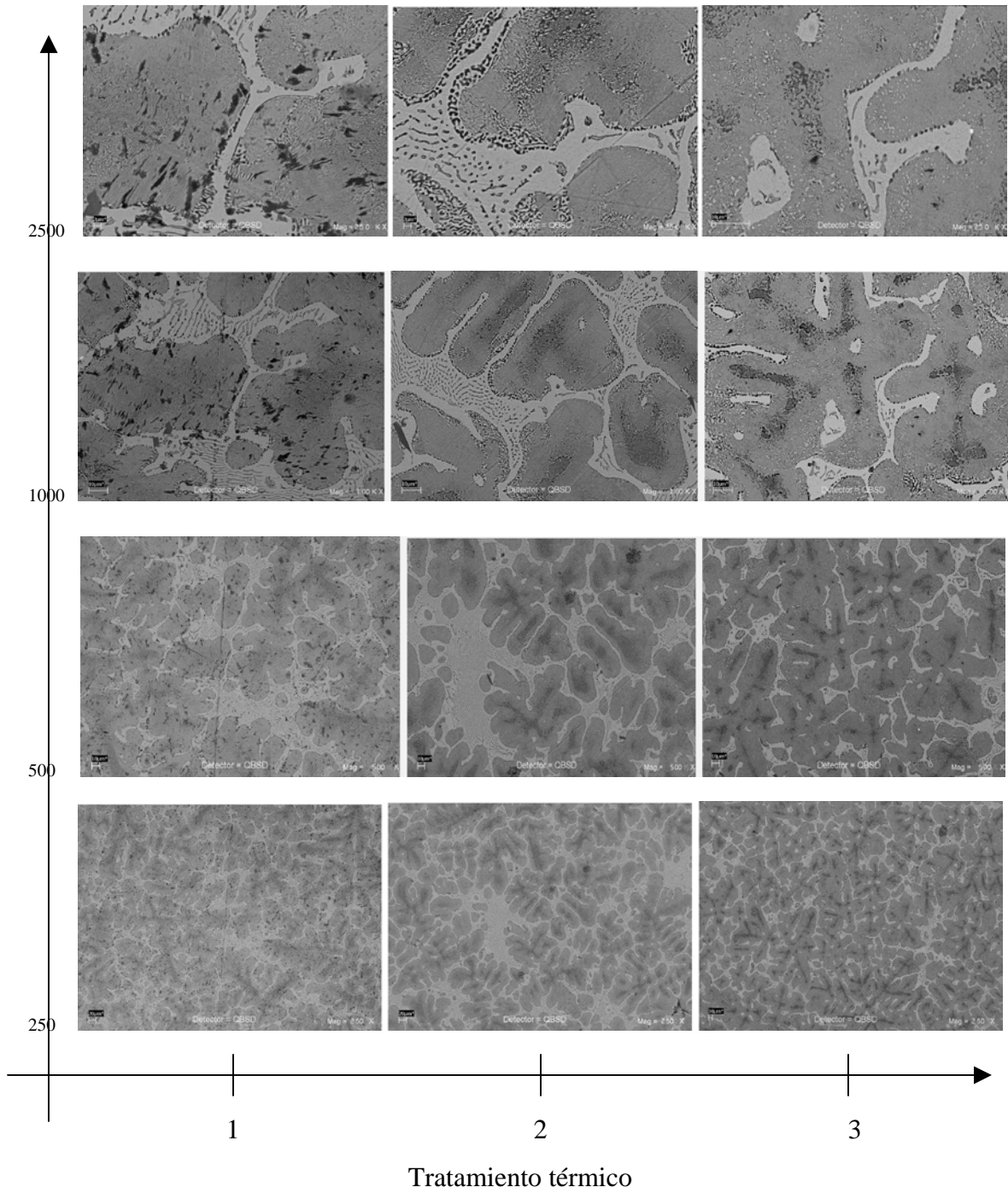


Figura 4.22. Metalografías presentadas en forma matricial. En las filas: amplificación microscópica. En las columnas: número de veces a las que se trató térmicamente a 300°C.

Prueba de control

En la figura 4.22, se pueden observar las metalografías de zinalco® sometido al mismo tratamiento térmico que las muestras de la figura 4.17, pero sin experimentar ninguna clase de deformación, es decir, las muestras fueron calentadas a 300° C durante 50 minutos, que es el tiempo en que ocurre un paso de extrusión a una barra de 50 mm a una velocidad de 1mm/min y enfriadas hasta 20° C. La muestra 1 se calentó una vez, la muestra 2, dos veces y la muestra 3, tres veces, simulando el mismo ambiente térmico que experimentaron las muestras deformadas por medio de ECAC.

Las metalografías presentadas en las figuras 4.17 y 4.22 muestran una diferencia evidente entre las microestructuras del material que ha experimentado una deformación mediante extrusión en canal angular constante, la cual presenta remanencias dendríticas y del material que ha sido tratado sólo térmicamente. Si bien es cierto que el ancho de placa de la estructura perlítica se ha refinado, no se aprecia ninguna clase rompimiento como el que aparece señalado en el recuadro de la figura 4.20.

Al evaluar las características de la microestructura producida en el zinalco® mediante el uso de extrusión en canal angular constante, incluyendo el efecto de rotación de la muestra usando la ruta de proceso Bc, encontramos que el efecto más significativo es un refinamiento sustancial en el promedio de tamaño de grano después de una pasada sencilla a través del dado. Las características microestructurales precisas después de ECAC son dependientes de la ruta de proceso y en la práctica se encuentra que, por lo menos para la condición donde el ángulo interno Φ dentro del dado es 90°, una condición favorable de extrusión es la ruta Bc donde la microestructura resultante evoluciona más rápidamente hacia un grupo de granos equiaxiales.

Hay dos características fundamentales asociadas con el desarrollo de microestructuras homogéneas a través de ECAC. Estas características son el tamaño de grano estable conseguido mediante el proceso de presionar la muestra a través del dado y el número de pasos de extrusión necesarios para obtener una microestructura homogénea.

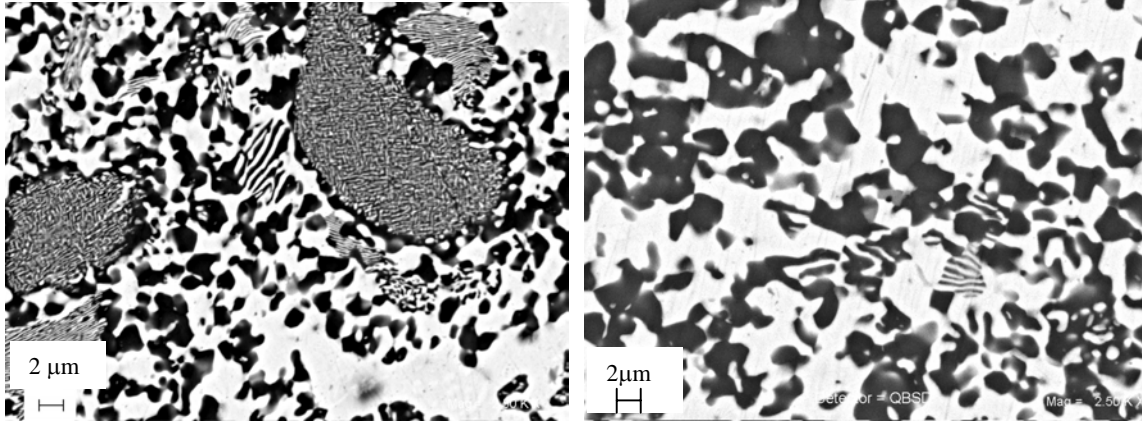
Aunque en el presente estudio no se realizaron pruebas mecánicas a las muestras de zinalco® procesadas con el extrusor en canal angular constante, algunas referencias han confirmado que ésta técnica puede ser usada para obtener materiales que presentan altas elongaciones superplásticas a muy altas velocidades de deformación.

El gran potencial de la extrusión en canal angular constante, es que permite una reducción significativa en el tamaño de grano a niveles excepcionalmente bajos (granos ultrafinos), así como una modificación de la microestructura. El incremento de la ductilidad en materiales con granos equiaxiales ultra finos puede ser explicado en términos de que la deformación ocurre de manera uniforme. Para materiales con granos de geometría no equiaxial, los planos de deslizamiento podrían cruzar límites de grano individuales teniendo deformaciones no uniformes en las intersecciones de límite de grano – plano de deslizamiento. Por el contrario, en materiales de grano ultra fino, el plano se propaga aproximadamente a través de la matriz uniforme.

Según Langdon et al ^[3]; el proceso ECAC resulta favorecido a temperaturas elevadas, especialmente cuando se usa un material donde los esfuerzos requeridos para presionarlo pueden exceder la capacidad de carga. Ahora bien, es importante hacer notar los datos de la tabla 4.1, donde el tamaño de grano fino conseguido a 240° y un sólo paso de extrusión es menor aunque aparecen zonas extensas de fase α sin romperse, mientras que a 300° y con tres pasos de extrusión no hay presencia de estructura dendrítica y sólo se aprecian remanencias de la estructura perlítica y la estructura de grano fino es homogénea.

	Condiciones de temperatura y pasos de extrusión	
	240° y 1 paso	300° y 3 pasos con ruta Bc
Promedio tamaño de grano	1.53 μm	5 μm

Tabla 4.1. Tamaño de grano en función de las condiciones de procesado



240° y 1 paso

300° y 3 pasos con ruta Bc

Figura 4.23. Referencia ilustrativa para la elaboración de la tabla 4.1. Amplificación, 2500 X

Cuando el material se somete al proceso de ECAC a 240°C, no existe una transformación de fase dentro de la estructura del material al salir del dado de extrusión y enfriarse a 20°C. Al establecer las condiciones de prueba a esta temperatura, el material permanece en la región $\alpha + \eta$, y es posible determinar la cantidad y composición de cada fase presente (tabla 4.2).

Temperatura °C	Fases	Composición	Cantidad
240	$\alpha + \eta$	$\eta = 1.5\% \text{ Al}$ $\alpha = 79\% \text{ Al}$	$\eta = \pm 73.55\%$ $\alpha = \pm 26.45\%$
20	$\alpha + \eta$	$\eta = 0\% \text{ Al}$ $\alpha = 99\% \text{ Al}$	$\eta = \pm 77.8\%$ $\alpha = \pm 22,2\%$

Tabla 4.2 Fases y Composiciones presentes en el zinalco® cuando se lleva a cabo el proceso ECAC a 240°C.

Cuando el material se somete al proceso de ECAC a 300°C, existe una transformación de fase dentro de la estructura del material al salir del dado de extrusión y enfriarse a 20°C. Al establecer las condiciones de prueba a esta temperatura, el material experimenta las transformaciones $\beta \rightarrow \alpha + \beta \rightarrow \alpha + \eta$. El aumento de temperatura y los cambios de fase pueden promover o favorecer el crecimiento de grano establecido en la tabla 4.1.

Un material compuesto por un gran número de granos tiene muchos bordes de grano, que representan áreas de alta energía, debido a una gran cantidad de defectos en el arreglo espacial de los átomos (compactación ineficiente). Si se produce una reducción en el área total de bordes de grano mediante el crecimiento de los mismos, el material presentará una energía general inferior. El crecimiento de los granos involucra desplazamientos de los bordes de grano, permitiendo que algunos granos crezcan a costa de otros. En este caso, los átomos difunden a través de los bordes de grano y en consecuencia, el crecimiento de grano está relacionado con la energía de activación necesaria para que un átomo se desplace a través del borde de grano. Altas temperaturas o bajas energías de activación incrementarán el tamaño de los granos.

Un aumento de temperatura en el proceso conduce primeramente a la aniquilación de las dislocaciones acumuladas y subsecuentemente a la relajación de esfuerzos. Esta relajación de esfuerzos tiene relación con el crecimiento de grano. En otras palabras, la recuperación de frontera de grano está controlada por difusión.

El rompimiento de la estructura dendrítica se incrementa con el número de pasos de extrusión hasta una última forma que presenta una distribución aleatoria visible después de 3 pasos de extrusión, figura 4.17.

El refinamiento de grano en ECAC depende del índice de recuperación en el cual, el refinamiento es mejorado cuando los índices de recuperación son reducidos mediante dos formas^[8,9]:

- Alear el material, como es la adición de Cu a la matriz de Zn – Al. La adición de Cu a la matriz de zinc – aluminio baja la movilidad de dislocaciones y de ese modo, se reduce el índice de recuperación.
- Con un decremento en la energía por fallas en el apilamiento, como ocurre en ECAC para cobre puro.^[3,9,10]

Entonces, la extrusión en canal angular constante es un proceso que tiene la capacidad de lograr tamaños de grano ultrafinos en el material. Esto se ve favorecido cuando el material tiene una baja energía de falla en el apilamiento y su consecuentemente bajo

índice de recuperación que conduce a evolución total de la microestructura durante el proceso. Esto se debe a que las dislocaciones están suficientemente disociadas, por lo que su ascenso y el deslizamiento de cruce se dificultan. Aunque también debe tomarse en cuenta la temperatura de proceso, dado que un incremento de ésta, tendrá como consecuencia un crecimiento de grano.

Resultados RX

En la figura 4.24, se aprecia el patrón de difracción de rayos X de la aleación Zn- 22% Al- 2% Cu (gráfica superior); abajo, los patrones de difracción correspondientes a tres zonas de una muestra del mismo material procesado mediante ECAC a 240° C. Las zonas de extrusión fueron establecidas en la figura 4.15.

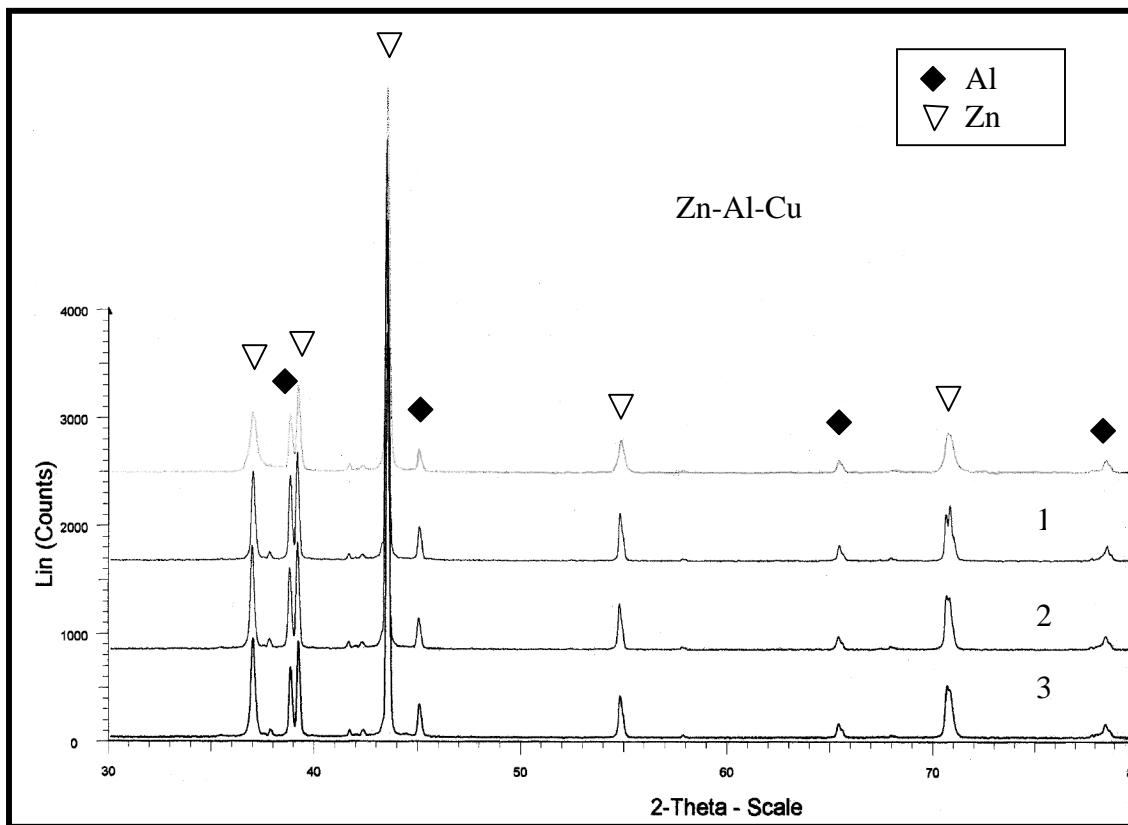


Figura 4.24. Patrón de difracción del sistema Zn- 22% Al- 2% Cu. Gráfica superior, corresponde a zinalco® sin procesar. Las gráficas 1, 2 y 3 son tres zonas de una muestra procesada mediante ECAC a 240°C.

Pueden apreciarse también las dos fases que constituyen el material, por un lado, señalado con triángulos, los planos (002), (100), (101) y (102), los planos (103) y (110) acoplados en ≈ 71 de la escala 2θ que corresponden al zinc, con una estructura hexagonal compacta, mientras que los rombos pertenecen a los planos (111), (200), (220) y (311) del aluminio con una estructura cúbica centrada en las caras.

Es también relevante, que no hay desplazamientos ni cambios en las fases del material de partida con respecto al que ha sido procesado por medio del sistema ECAC a 240°C .

Resultados de dureza Rockwell B (R_B)

Las pruebas de dureza nos permiten observar un aumento en los valores de las muestras extrudidas con respecto a muestras que no ha sido procesadas mediante ECAC, y posteriormente un decremento en función del número de pasos de extrusión, esto, debido al rompimiento de la microestructura dendrítica que da lugar a la estructura de grano fino. Las mediciones de dureza se realizaron por triplicado, la gráfica 4.25 presenta los promedios para cada una de las muestras.

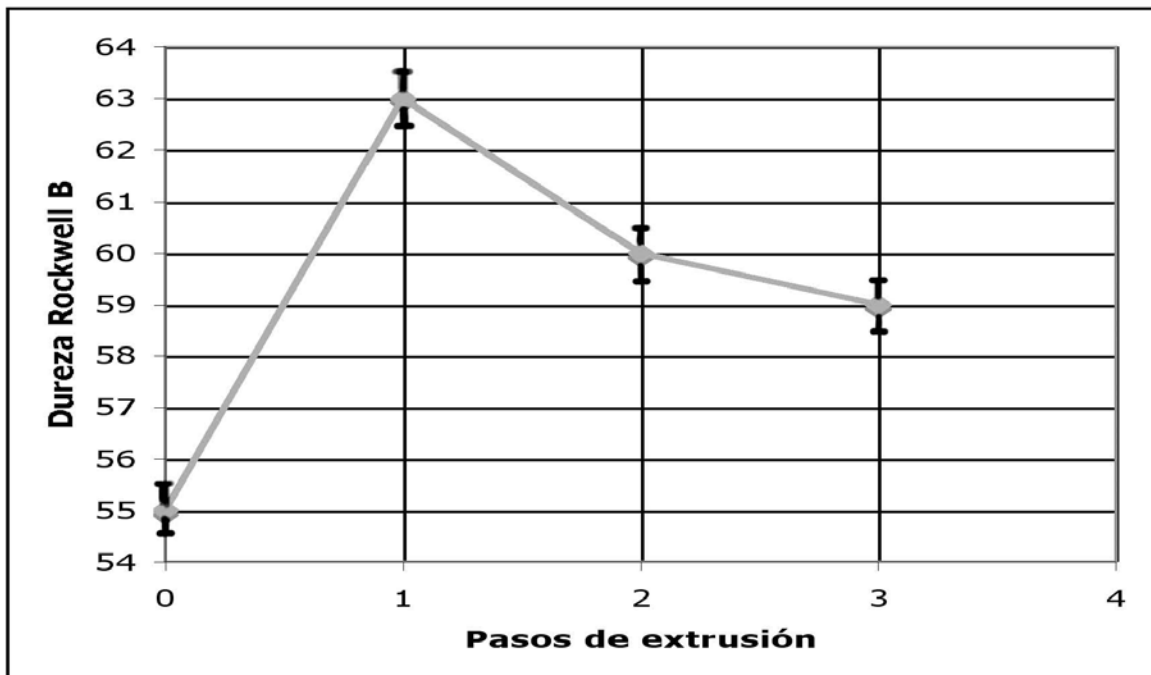


Figura 4.25. Dureza Rockwell B para el sistema zinalco® en función del número de pasos de extrusión en canal angular constante

CONCLUSIONES

Se diseñó y se fabricó un sistema de extrusión en canal angular constante, (ECAC), con el propósito de modificar el comportamiento mecánico del zinalco®.

Al procesar muestras de la aleación zinalco®, (Zn – 22% Al – 2% Cu) se determinó lo siguiente:

La extrusión en canal angular constante es un proceso termomecánico de refinación de grano para materiales policristalinos, el cual provoca una intensa deformación plástica a la muestra a través de deslizamiento puro pero sin ningún cambio en las dimensiones de sección transversal. De este modo, con pasos repetitivos a través del dado se pueden producir deformaciones muy altas. La refinación ocurre desde el primer paso de extrusión.

Barras del material fueron sometidas al proceso ECAC para producir un tamaño de grano de 1.53 μm a 240°, aunque no se rompe toda la estructura dendrítica. Cuando la aleación se procesó a 300° y con tres pasos de extrusión siguiendo la ruta Bc, el tamaño de grano final fue de 5 μm , homogéneo en toda la muestra.

La modificación de estructura perlítica hasta grano fino se debe a la deformación plástica severa a la que se sometió la muestra a través de pasos repetitivos de extrusión en canal angular constante y no al tratamiento térmico.

A partir del análisis metalográfico se pudo determinar la evolución microestructural donde las estructuras dendríticas de la aleación son modificadas hasta conseguir estructuras de grano fino.

El tamaño de grano fino generado por ECAC genera potencialmente comportamiento superplástico a elevadas velocidades de deformación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] FURUKAWA, M., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T. G. 2001. Materials Science Forum. Vol. 357 – 359. pp 489 – 498.
- [2] MATHIEU, J. - P., SUWAS, S., EBERHARDT, A., TÒTH, L. S., MOLL, P. 2006. Journal of Materials Processing Technology. 173. P. 29 – 33.
- [3] YAMASHITA, A., YAMAGUCHI, D., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T. G. 2000. Materials Science and Engineering. A287. p. 100 – 106
- [4] FURUKAWA, M., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T. G. 2001. Journal of Materials Science. Vol. 36. p. 2835 - 2843
- [5] SEGAL, V. M. 1995. Materials Science and Engineering. Vol. A197. p. 157 – 164.
- [6] SEGAL, V.M. 2004. Materials Science and Engineering. A 386 p. 269- 276
- [7] FURUKAWA, M., IWAHASHI, Y., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON. 1998. Materials Science and Engineering A. Vol A 257. p. 328- 332
- [8] IWAHASHI, Y., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T.G. 1998. Acta Materialia. Vol. 46. No. 9 p. 3317- 3331
- [9] IWAHASHI, Y., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T. G. 1997. Acta Materialia Vol. 45. pp. 4733 - 4741.
- [10] KOMURA, S., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T.G. 1999. Journal Material Research. Vol. 14. No. 10 p. 4044- 4050
- [11] IWAHASHI, Y., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T.G. 1998. Metallurgical and Materials Transactions. Vol. 29A. No. 11 p. 2503- 2510
- [12] HUANG, Y., LANGDON, T.G. 2003. Materials Science and Engineering. A 358 p. 114- 121.
- [13] FURUKAWA, M., UTSUNOMIYA, A., KOMURA, S., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T. G. 2001. Materials Science Forum. Vol. 357 – 359. pp 431 – 436.
- [14] HUANG, Y., LANGDON, T.G. 2002. Journal of Materials Science. Vol. 37. p. 4993- 4998
- [15] FURUKAWA, M., HORITA, Z., LANGDON, T.G. 2002. Materials Science and Engineering. Vol A 332. p. 97- 109
- [16] WU, Y., BAKER, I. 1997. Scripta Materialia. Vol 37. No. 4. p. 437 –442

- [17] IWAHASHI, Y., WANG, J., HORITA, Z., NEMOTO, M., LANGDON, T.G. 1996. *Scripta Materialia*. Vol. 35. No. 2. p. 143 – 146.
- [18] FURUKAWA, M., MA, Y., HORITA, Z., NEMOTO, M., VALIEV, R. Z., LANGDON, T. G. 1998. *Materials Science and Engineering A* vol 241. p 122 – 128.
- [19] MONTEMAYOR-ALDRETE, J. A., MUÑOZ-ANDRADE, J. D., TORRES-VILLASEÑOR, G. MENDOZA-ALLENDE, A. 2001. *Research Development Metallurgical & Materials Science*. Vol. 5. P. 11 - 31
- [20] VALIEV, R.Z., ISLAMGALIEV, R.K., YUNUSOVA, N. F. 2001. *Materials Science Forum*. Vol. 357– 359. pp 449 – 458.
- [21] HERLING, D. R., SMITH, M. T. 2001. *Materials Science Forum*. Vol. 357 – 359. pp 465 – 470.
- [22] LUIS, C.J., GARCES, Y. 2002. *Revista de Metalurgia*. Vol. 38. pp. 270 – 287
- [23] FERRASSE, S., SEGAL, V. M., KALIDINDI, S. R. ALFORD, F. 2004. *Materials Science and Engineering A368*. p. 28 – 40.
- [24] FERRASSE, S., SEGAL, V. M., ALFORD, F. 2004. *Materials Science and Engineering A372*. p. 235 – 244
- [25] WU, P. C., CHANG, C. P., KAO, P. W. 2004. *Materials Science and Engineering A374*. p. 196 – 203.
- [26] CAO. W. Q., GODFREY, A. LIU, Q. 2003. *Materials Science and Engineering A361*. p. 9 – 14.
- [27] HUANG, W.H., CHANG, L., KAO, P.W., CHANG, C.P. 2001. *Materials Science and Engineering*. Vol A 307. p. 113- 118
- [28] DeLO, D.P., SEMIATIN, S.L. 1999. *Metallurgical and Materials Transactions*. Vol. 30A. p. 1391- 1402
- [29] SUWAS, S., TÓHT, L.S., FUNDENBERGER, J.J., EBERHARDT, A., SKROTZKI, W. 2003. *Scripta Materialia*. Vol. 49. p. 1203- 1208.
- [30] MARKUSHEV, M. V., MURASHKIN, M. Yu., PRANGNELL, P. B., GHOLINIA, A., MAIOROVA, O.A. 1999. *Acta Metallurgica*. p 839-842
- [31] FERRASE, S., SEGAL, V. M., ALFORD, F. 2004. *Materials Science and Engineering Vol. A372*. p. 44-55

- [32] HWANG, B., LEE, H.S., KIM, Y.G., LEE, S., AHN, B.D., SHIN, D.H., LEE, C. G. 2005. Metallurgical and Materials Transactions A. Vol. 36A. p 389 – 397
- [33] KRASILNIKOV, N., LOJKOWSKI, W., PAKIELA, Z., VALIEV, R. 2005. Materials Science and Engineering A vol 397. p 330 – 337.
- [34] PADMANABHAN, K.A., DAVIES, G.J. 1980. Springer- Verlag Berlin Heidelberg.
- [35] EVANGELISTA, E. SPIGARELLI, S. 2002. Metallurgical and Materials Transactions A. vol. 33A. p. 373 – 381.
- [36] BIELER, T. R., MISHRA, R. S., MUKHERJEE, A,K. 1996. .
- [37] PURCEK, G. 2005. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 169. P. 242 – 248.
- [38] PURCEK, G., ALTAN, B. S., MISKIOGLU, I., OOI, P. H. 2004. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 148. P. 279 – 287.
- [39] DORANTES – ROSALES, H. J., LOPEZ – HIRATA, V. M., CRUZ – RIVERA, J. J., SAUCEDO – MUÑOZ, M. L. 2005. Materials Letters. Vol. 59. P. 2075 – 2078.
- [40] MONTEMAYOR-ALDRETE, J. A., MUÑOZ-ANDRADE, J. D., MENDOZA-ALLENDE, A. 2002. Revista Mexicana de Física Vol. 48 (3) p 210 – 214.
- [41] MUÑOZ-ANDRADE, J.D., MENDOZA-ALLENDE, A., TORRES-VILLASEÑOR, G., MONTEMAYOR-ALDRETE, J. A., 2001. Journal of Materials Science. Vol. 36 p. 795 - 799.
- [42] SANDOVAL-JIMENEZ, A., NEGRETE, J., TORRES-VILLASEÑOR, G.2000. Revista Mexicana de Física. Vol. 46 (4) p. 361-366
- [43] MUSIN, F., KAIBYSHEV, R., MOTOHASHI, Y., ITOH, G. 2004. Scripta Materialia. Vol. 50 p. 511- 516
- [44] UGALDE, P., CANALES, A., MENDOZA-ALLENDE, A., MONTEMAYOR-ALDRETE, J. A. 1999. Revista Mexicana de Física. Vol. 45. p. 501-509.
- [45] YADAV, S., CHICHILI, D.R., RAMESH, K.T. 1995. Acta Metallurgica Mater Vol. 43, No 12. p. 4453 – 4464
- [46] MUÑOZ, J.D., ARIZMEDI, A., MENDOZA-ALLENDE, A., MONTEMAYOR-ALDRETE, J.A. 1997. Journal of Materials Science. Vol. 32. p. 3189-3193