



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
VICERRECTORADO ACADÉMICO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN BIOMEDICINA
Y CIENCIAS APLICADAS “DRA. SUSAN TAI”
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**FABRICACIÓN DE UN EQUIPO DE EXTRUSIÓN PARA EL
REFINAMIENTO DE GRANO: APLICACIÓN A LA ALEACIÓN
Al-Mg-Si-La**

Trabajo presentado por:

M.Sc. Solange Ysbeth Paredes Dugarte

Como requisito parcial para ascender a la categoría de Profesor Titular

Cumaná, abril 2024

AGRADECIMIENTOS

A DIOS Todopoderoso por cada despertar, por cada paso, cada logro, cada prueba, por iluminar mi camino y por todas esas maravillosas bendiciones que Tú nos ofreces día a día.

A mi hija Samantha y a mis nietas Paola y Brianna por apoyarme incondicionalmente en mis largas jornadas de trabajo y por ser la razón principal de mi existencia.

A mis queridos hermanos por su inmenso cariño, consejos y ayuda incondicional.

Quiero agradecer especialmente al Dr. Benjamín Hidalgo-Prada con quien comencé el desarrollo de esta investigación, por su generosidad, su incansable espíritu de transmitirnos conocimientos, por sus grandes aportes en mi formación académica, y su inagotable energía. Que Dios lo tenga en su Santa Gloria.

Quiero extender mi más sincero agradecimiento al personal del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales de CVG-Sidor por toda su colaboración durante mi estadía en este Instituto para el desarrollo de los análisis de metalografía, especialmente a la M.Sc Maritza Barrera y a la Dra. Gloria Basanta, a las que me une una bonita y sincera amistad.

A la Universidad de Oriente y al personal del IIBCAUDO por su apoyo para la realización de esta investigación.

A todas las personas que contribuyeron con su presencia, apoyo, enseñanzas y trabajo extra.

Gracias.....

FABRICACIÓN DE UN EQUIPO DE EXTRUSIÓN PARA EL REFINAMIENTO DE GRANO: APLICACIÓN A LA ALEACIÓN Al-Mg-Si-La

Trabajo presentado como requisito parcial para ascender a la categoría de Profesor Titular. Universidad de Oriente. Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas “Dra. Susan Tai”. 2024.

M.Sc. Solange Y. Paredes D.

RESUMEN

Las nuevas tecnologías han demostrado el impacto que tiene el tamaño del grano en las propiedades de los materiales metálicos, de tal forma que su refinamiento a escala nanométrica se ha convertido en un reto para los investigadores e ingenieros de la ciencia de materiales. En la práctica el prensado por presión en canal angular de sección constante, ECAP (del acrónimo en inglés Equal Channel Angular Pressing) es uno de los métodos con mayor potencial para procesar materiales policristalinos con tamaño de grano ultrafino. Esta técnica consiste en presionar una muestra a través de una matriz especial que contiene dos canales de igual sección transversal que se interceptan un ángulo Φ . El material al ser forzado a pasar a través de la intersección de los canales se deforma fuertemente por cizalladura simple y de esta manera se consigue afinar el tamaño de grano.

En este sentido el propósito de este trabajo consistió en fabricar y poner a punto un equipo de extrusión por ECAP con el fin de procesar la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La y evaluar su respuesta frente a la deformación aplicada, específicamente en dos aspectos: refinamiento de grano y propiedades mecánicas (microdureza). La aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La se obtuvo adicionando 0,14% La a una aleación comercial de aluminio AA6063 destinada para extrusión como posible vía para reducir el efecto nocivo de las partículas intermetálicas ricas en hierro en la extrudabilidad de la aleación.

El diseño del equipo ECAP, el cual consta de un punzón y una matriz, se hizo en base a la configuración y dimensiones de las mordazas de la máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z250, utilizada para acoplar el dispositivo y llevar a cabo los ensayos de extrusión. Para fabricar el punzón y los dos bloques que constituyen la matriz se seleccionó el acero AISI 4140 (Cr-Mo). En cada uno de los bloques se mecanizaron dos canales rectangulares de 6 mm^2 de sección transversal y se interceptaron un ángulo $\Phi = 90^\circ$ en forma de “L”. Adicionalmente, se diseñó y fabricó, en acero al carbono ASTM A38, una base y una tapa para encofrar la matriz y evitar que los bloques se separaran durante el proceso de extrusión. Para la puesta a punto del equipo, del tocho de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada, se cortaron y mecanizaron probetas

rectangulares de $11,7 \text{ mm}^2$ de sección transversal y de 117 mm de longitud, luego se lubricaron con bisulfuro de molibdeno y se fueron procesaron en la matriz ECAP hasta lograr obtener una aplicación con los parámetros adecuados para extruir las probetas sin ningún tipo de falla. La aplicación se creó en modo compresión con el programa TestXpert II que controla la máquina de ensayo universal. Posteriormente, se procesaron a temperatura ambiente probetas con uno, dos, tres y cuatro pases consecutivos con una velocidad del cabezal de 1 mm/s aplicando la ruta B_C , que consiste en rotar la muestra 90° alrededor de su eje longitudinal cada vez que se reinserta en el canal. Para la caracterización microestructural por microscopia óptica y conocer la respuesta mecánica del material procesado por ECAP se cortaron de cada una de las probetas procesadas muestras en el sentido de la dirección de la extrusión.

Todas las curvas registradas durante el procesamiento de las probetas con uno, dos, tres y cuatro pases consecutivos por la matriz ECAP presentaron el mismo comportamiento iniciándose con un rápido incremento de la fuerza aplicada hasta alcanzar un valor máximo, en el cual la pendiente de la curva cambia y la fuerza comienza a disminuir progresivamente. Tampoco se observaron irregularidades a lo largo de las curvas sugiriendo que los lingotes no presentaron grietas o serraciones durante el proceso de extrusión. Se alcanzaron fuerzas máximas entre 12000 y 18000 N ratificando el incremento de la resistencia del material por efecto de la deformación aplicada.

Los resultados del análisis microestructural de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La evidenció que con la matriz ECAP y las condiciones experimentales impuestas se consiguió refinar el tamaño de grano del material, obteniéndose en la probeta con cuatro pases consecutivos una reducción de un 64,7% con respecto al tamaño de grano de la aleación sin procesar. En cuanto al aspecto de radio, el cual es una medida de elongación de los granos, se observó un incremento en las probetas con uno y dos pases consecutivos en la matriz ECAP, a partir de allí disminuyó progresivamente alcanzándose en el último cuarto pase un valor semejante al obtenido con un solo pase, sugiriendo que la estructura de grano tiende a adquirir una forma más equiaxial a medida que aumenta la deformación, en concordancia con las predicciones teóricas.

Las medidas de microdureza Vickers mostraron que con solo dos pases la dureza presentó un incremento significativo de un 36,4% en relación a la aleación sin procesar. Este comportamiento sugiere que el proceso por ECAP es una forma eficiente y rápida de mejorar las propiedades mecánicas de los materiales. Con el incremento del número de pases la dureza sigue aumentando, aunque no tan pronunciadamente como en los dos primeros pases con tendencia a la saturación, obteniéndose un aumento de un 43,9% con el último cuarto pase.

Estos resultados muestran que la buena extrusión a temperatura ambiente y el refinamiento microestructural obtenido en la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada hace que la deformación plástica severa por ECAP pudiera tener una buena acogida a nivel industrial para obtener aleaciones comerciales de aluminio con mejores propiedades mecánicas que pueden satisfacer demandas personalizadas para aplicaciones específicas.

Palabras claves: deformación plástica severa (SPD), presión en canal angular de sección constante (ECAP), refinamiento de grano, aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General	3
Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Materiales de grano ultrafino - Deformación plástica severa	5
2.2. Proceso ECAP	8
2.3. Parámetros del proceso ECAP	10
2.3.1. Deformación por cizalladura simple (γ)	10
2.3.2. Deformación plástica equivalente, ϵ	11
2.3.3. Esfuerzo efectivo, σ	13
2.3.4. Presión, P	13
2.4. Rutas de procesamiento por ECAP	14
2.5. Factores a considerar para el diseño y fabricación de una matriz ECAP.....	17
2.5.1. Geometría del canal	17
2.5.2. Fricción de contacto	19
2.5.3. Temperatura del proceso	19
2.5.4. Presión del punzón	20
2.5.5. Velocidad de extrusión	20
2.5.6. Material.....	21
2.6. Microestructura típica de los materiales de granos ultrafinos.....	22
2.7. Propiedades mecánicas.....	23
2.7.1. Resistencia y ductilidad	23
2.7.2. Superplasticidad	25

2.8. Aplicaciones del método ECAP.....	25
CAPÍTULO III.....	28
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	28
3.1. Fabricación del equipo de extrusión ECAP	28
3.2. Instalación del equipo ECAP	34
3.3. Material y dimensiones de los lingotes	34
3.4. Procesamiento ECAP y puesta en funcionamiento.....	35
3.5. Condiciones del ensayo.....	38
3.6. Caracterización por microscopía óptica de la microestructura de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La antes y después de procesada por ECAP	38
3.6.1. Preparación de las probetas y equipos utilizados	38
3.7. Caracterización mecánica – Microdureza Vickers.....	41
3.7.1. Preparación de las muestras y equipo utilizado.....	41
CAPÍTULO IV	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1. Fabricación y puesta en funcionamiento de un equipo de extrusión por presión en canal angular de sección constante (ECAP).....	43
4.1.1. Nueva matriz ECAP	45
4.2. Procesamiento de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La.....	47
4.2.1. Representación esquemática.....	53
4.3. Caracterización por microscopía óptica de la microestructura de la zona de corte ...	58
4.4. Estructura de grano	62
4.5. Microdureza Vickers.....	65
4.6. Consideraciones generales sobre el incremento de la dureza durante la deformación ECAP.....	67
CAPÍTULO V	69
CONCLUSIONES	69
REFERENCIAS.....	71
HOJAS DE METADATOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representación esquemática de los métodos de deformación plástica severa mencionados para el refinamiento de grano [2].	7
Figura 2.2. (a) Representación esquemática de la matriz ECAP ensamblada, (b) características geométricas del canal de la matriz [26].	9
Figura 2.3. Representación esquemática de la distorsión de un elemento cuadrado por cizalladura simple [29].	10
Figura 2.4. Rutas de procesamiento ECAP [32].	15
Figura 2.5. Ilustraciones esquemáticas de la deformación del elemento cúbico después de cuatro pases en el ECAP mediante las rutas A, B _A , B _C y C [34].	17
Figura 2.6. Micrografías por MET de la aleación Al-4% Cu-0.5% Zr: (a) después de deformación severa ($\epsilon = 7$) y (b) después del recocido a 106 °C durante 1 h [49].	23
Figura 2.7. Comparación de la resistencia y ductilidad de metales nanoestructurados y de grano grueso [52].	24
Figura 2.8. Placa para osteosíntesis ósea de Ti nanoestructurado [57].	25
Figura 2.9. Barra de Ti procesada por ECAP. Tamaño en pulgadas [57].	26
Figura 3.1. Esquemas de la geometría de los dos bloques y de la matriz ECAP ensamblada propuesta por Segal [8,27].	28
Figura 3.2. Esquemas con las medidas del punzón (a), de los bloques (b) y de la matriz ensamblada (c).	30
Figura 3.3. a) Pieza de acero, b) mecanizado del canal, c) vista de los bloques con el canal y orificios mecanizados y d) bloques acoplados.	31
Figura 3.4. Esquemas con las medidas de: a) tapa, b) base y c) base y tapa conectadas con tornillos.	33
Figura 3.5. (a) Esquema de las dimensiones de los lingotes para el proceso de extrusión, (b) lingotes mecanizados.	35
Figura 3.6. Fotografías mostrando: (A) vista superior de: a) lingote sin extruir, b) lingote con 1 Pase y c) lingote con 4 Pases sucesivos en el ECAP. (B) vista lateral de los lingotes mostrando claramente la cuña que se forma en el plano de cizalla y los cortes realizados a los lingotes después de cada pase en la matriz ECAP.	37
Figura 3.7. Secuencia del proceso de extrusión [40].	37
Figura 3.8. Esquema de la rotación del lingote correspondiente a la Ruta de procesamiento B _C [32].	38
Figura 3.9. Representación esquemática del canal de la matriz ECAP mostrando los tres planos ortogonales X, Y y Z en la muestra procesada.	39
Figura 3.10. Micrografías ópticas ilustrando granos delineados y medidas de la longitud y ancho de cada uno de ellos. a) granos equiaxiales (aleación Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada) y b) granos elongados (aleación Al-Mg-Si-0,14%La extruida tres veces consecutivas en la matriz ECAP).	40

Figura 4.1. Fotografías: a) matriz ECAP evidenciando la separación de los dos bloques durante el proceso de extrusión, b-c) vista frontal e inferior del lingote extruido con formación de rebaba ..	44
Figura 4.2. Fotografía mostrando formación de grietas en la matriz ECAP.....	44
Figura 4.3. Micrografías ópticas mostrando la distorsión de la microestructura del material debido a la abertura de la matriz durante el proceso de extrusión. Magnificación: 50X.....	45
Figura 4.4. Fotografías del nuevo equipo ECAP: a) los dos bloques que constituyen la matriz mostrando el canal en forma de “L”, b) los bloques con los pernos y tornillos, b) punzón, c) tapa, d) base con tornillos, e) base y tapa acopladas.....	46
Figura 4.5. Fotografías mostrando la instalación del equipo ECAP a la máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z250	47
Figura 4.6. Fotografías mostrando: a) lingote extruido saliendo de la matriz ECAP, b) lingote extruido en el canal de salida, c) lingote sin extruir y d) lingote con un pase	48
Figura 4.7. Curva de la fuerza aplicada versus desplazamiento del punzón, registrada para el lingote extruido una vez en la matriz ECAP	49
Figura 4.8. Curvas de la fuerza aplicada versus desplazamiento del punzón, registradas para el lingote extruido dos veces consecutivas en la matriz ECAP. (a): primer pase y (b): segundo pase .	49
Figura 4.9. Curvas de la fuerza aplicada versus desplazamiento del punzón del lingote extruido tres veces consecutivas en la matriz ECAP. (a): primer pase, (b): segundo pase y (c): tercer pase.....	50
Figura 4.10. Curvas de la fuerza aplicada versus desplazamiento del punzón, registradas para el lingote extruido cuatro veces consecutivas en la matriz ECAP. (a): primer pase, (b): segundo pase, (c): tercer pase y (d): cuarto pase	50
Figura 4.11. Esquemas indicando la posición del punzón (\Downarrow) y del lingote dentro del canal en los puntos señalados en la curva correspondiente al primer pase (curva (a)) del lingote extruido tres veces consecutivas en la matriz ECAP.....	53
Figura 4.12. Esquemas indicando la posición del punzón (\Downarrow) y del lingote dentro del canal en los puntos señalados en la curva correspondiente al segundo pase (curva (b)) del lingote extruido tres veces consecutivas en la matriz ECAP.....	54
Figura 4.13. Esquemas indicando la posición del punzón (\Downarrow) y del lingote dentro del canal en los puntos señalados en la curva correspondiente al tercer pase (curva (c)) del lingote extruido tres veces consecutivas en la matriz ECAP.....	54
Figura 4.14. a) Ensayo de extrusión interrumpido durante el primer pase de un lingote de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La; b) Microestructura del plano longitudinal de la zona de intersección de los dos canales. Magnificación 10X	58
Figura 4.15. Montaje de micrografías ópticas mostrando la evolución de la microestructura desde la región A hasta la región B correspondiente a la parte central de la zona de intersección de los dos canales.....	60
Figura 4.16. Montaje de micrografías ópticas mostrando la estructura granular en la esquina inferior del plano de intersección de los dos canales (región C)	61
Figura 4.17. Micrografía óptica mostrando la estructura de grano luego de pasar por plano de intersección de los dos canales (región D).....	61
Figura 4.18. Micrografía óptica mostrando la estructura de grano de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada.....	62

Figura 4.19. Micrografías ópticas mostrando la microestructura de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La obtenida con: a) un pase, b) dos, c) tres y d) cuatro pases consecutivos por la matriz ECAP.	64
Figura 4. 20. Variación del promedio del tamaño de grano y del aspecto de radio con respecto al número de pases en el ECAP de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La.	65
Figura 4.21. Evolución de la microdureza Vickers de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La durante el proceso ECAP	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Parámetros del proceso ECAP en múltiples extrusiones en matrices de ángulos: $2\Phi = 150^\circ$, 120° y 90° y $\psi = 0^\circ$ [8].	13
Tabla 3.1. Masa de las piezas que conforman el equipo ECAP	34
Tabla 3.2. Composición química (% en masa) de la aleación Al-Mg-Si-0,15%La determinada por Fluorescencia de Rayos-X.....	35
Tabla 4.1. Coordenadas de los puntos señalados en cada una de las curvas.....	52
Tabla 4.2. Parámetros utilizados en la realización de los esquemas	56

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes desafíos que enfrenta el sector industrial a nivel mundial es producir materiales fuertes, resistentes y livianos que permitan suplir las necesidades y requerimientos de nuestra sociedad. En este sentido, en los últimos años, estudios realizados han demostrado que la transición de la microestructura de la escala “micro” a la escala “nano” permite obtener materiales con mejores propiedades mecánicas, térmicas y reológicas, que los hacen idóneos para un sinnúmero de aplicaciones en áreas como la medicina, la química, la biología, la electrónica, la ciencia de materiales, el cuidado del medioambiente, entre otras [1]. En el campo de la metalurgia el énfasis está dirigido en desarrollar materiales metálicos nanoestructurados que presenten propiedades físicas, químicas y mecánicas significativamente superiores a las exhibidas por materiales tradicionales y que a su vez sean económicamente viables y rentables.

Actualmente, se dispone de dos tecnologías en competencia para la obtención de materiales nanoestructurados, los cuales se definen como sólidos que tienen características microestructurales en el rango de 1 a 100 nm en al menos una dimensión. Estas son: la técnica de la pulvimetalurgia (sintetizar, moler, compactar y sinterizar) de los nanopulvos y la deformación plástica severa, SPD (del acrónimo en inglés severe plastic deformation) [2]. Esta última dirigida a fabricar materiales con tamaños de grano ultrafino, inclusive en el orden de los nanómetros. El interés se debe a que es posible incrementar la resistencia de un material disminuyendo su tamaño de grano en acuerdo con la relación estándar de Hall-Petch, la cual establece que la resistencia del material es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño de grano [3].

Varios métodos de SPD se han desarrollado para obtener metales con un tamaño de grano extremadamente pequeño, como: Torsión a alta presión, HPT (del acrónimo en inglés High Pressure Torsion); Corrugado-Planchado Repetitivo, RCS (del acrónimo en inglés

Repetitive Corrugation and Straightening); Unión por laminado acumulativo, ARB (del acrónimo en inglés Accumulated Roll-Bond); Forja multidireccional, MDF (del acrónimo en inglés Multi-Directional Forging) y Presión en canal angular de igual sección transversal, ECAP (del acrónimo en inglés Equal Channel Angular Pressing) [4-8]. El desarrollo de estas tecnologías se ha apoyado en el avance de otras ramas de la ciencia e ingeniería ya que la mayoría de estos procesos son controlados con sistemas computarizados, modelamiento matemático, sensores, entre otros.

De estos métodos, el procesamiento ECAP es el que ha despertado mayor interés para la obtención de materiales de grano ultrafino. Fue desarrollado por V.M. Segal en 1972 en el Instituto Técnico de Física de la Academia de Ciencias de Bielorrusia, antigua Unión Soviética [8] y consiste esencialmente en deformar un material mediante un proceso de cizallamiento simple sin que se produzca cambio en el área de la sección transversal de la muestra, lo que permite repetir varias veces el proceso e incrementar la deformación en la pieza [8].

Una variedad de metales y aleaciones han sido procesados con esta técnica, entre ellos están: el cobre [9], níquel [10], titanio [29], acero Armco [12], aluminio puro [13], aluminio de pureza comercial [14], aleaciones de magnesio [15] y aleaciones de aluminio [16-18], entre otros. Las características de las microestructuras obtenidas con este método las hace potencialmente atractivas para muchas aplicaciones comerciales debido a la mejora en las propiedades mecánicas, especialmente la dureza, resistencia, y límite elástico que se producen en el material.

En este contexto, el propósito de este trabajo consistió en fabricar una matriz ECAP e instalarla en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos del IIBCAUDO con el propósito de establecer junto con el Laboratorio de Caracterización de Materiales una línea de investigación relacionada con el diseño, obtención y caracterización de nuevos materiales, que permita apoyar tanto a estudiantes de pregrado y postgrado como a investigadores y profesionales que buscan profundizar en el campo de los materiales nanoestructurados. Esto con el fin de participar activamente en el desarrollo tecnológico del país.

Para este propósito se establecieron los siguientes objetivos:

Objetivo General

Diseñar un equipo de extrusión por presión en canal angular de sección constante para el refinamiento de grano con aplicación a la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La.

Objetivos Específicos

Construir un equipo de extrusión por presión en canal angular de sección constante.

Procesar probetas de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada con uno, dos, tres y cuatro pases consecutivos.

Caracterizar por microscopía óptica la microestructura de las probetas de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La procesadas en el equipo de extrusión por presión en canal angular de sección constante.

Determinar la microdureza Vickers de las probetas de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La procesadas y relacionarlas con las características microestructurales.

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Materiales de grano ultrafino - Deformación plástica severa

Actualmente existe un creciente interés en la producción de materiales con tamaño de grano ultrafinos debido a que esta estructura proporciona un compromiso razonable entre alta resistencia y buena ductilidad, característica de gran utilidad para el desarrollo de materiales metálicos de alta eficiencia estructural. La resistencia y la ductilidad son las propiedades mecánicas principales de cualquier material, pero generalmente son características opuestas; los materiales pueden ser frágiles o dúctiles, pero raramente ambos a la vez.

Los materiales con tamaño de granos ultrafino o UFG (acrónimo del término en inglés ultra-fine-grain) incluyen los materiales de granos submicrométricos con diámetros entre de 1 y 0,1 μm y los materiales de granos nanométricos con tamaño de grano menor de 0,1 μm ó 100 nm [19,20].

Tradicionalmente, se reduce el tamaño de grano a través de la implementación de adecuados procesos termomecánicos que involucran regímenes seleccionados de calentamiento y deformación. Sin embargo, estos métodos presentan ciertas desventajas, una de ellas es que la ruta de procesamiento debe ser ajustada cada vez que ocurre un cambio apreciable en la composición de la aleación y que el tamaño de grano más pequeño que se logra obtener con estos métodos se encuentra en el intervalo entre 1-10 μm [21-22].

Como consecuencia de esas limitaciones se han desarrollado dos aproximaciones para fabricar materiales con tamaño de grano ultrafino [3,5]. En la primera se va de menor a mayor escala (Bottom-up), es decir, los materiales son fabricados adhiriendo átomos o consolidando sólidos compuestos de nanopartículas mediante técnicas como la condensación de gas inerte, el molino de bolas de alta energía y el desgaste por deslizamiento. El problema de estas técnicas es que están más orientadas a la fabricación

de muestras pequeñas más que a la producción de grandes piezas a gran escala que estén libres de impurezas o porosidades típicos de la metalurgia convencional. En la segunda, (Top-down), se parte de un sólido con tamaño de grano relativamente grande y, se procesa mediante deformación plástica severa (SPD, del acrónimo en inglés severe plastic deformation) para producir una microestructura con UFG.

Por lo que, el interés se ha centrado en el uso de la deformación plástica severa para el procesamiento de materiales volumétricos de tamaño de grano ultrafino. Refiriéndose a la deformación plástica severa como los distintos métodos de conformado en los que se imponen grandes deformaciones plásticas sobre el material sin cambios significativos en las dimensiones generales de la pieza, utilizando para ello herramientas con geometrías especiales, las cuales tienen como finalidad redireccionar el flujo del material para que éste pueda estar bajo presiones hidrostáticas [23]. La retención del área de la sección transversal de la muestra es lo que distingue a la SPD de los procesos industriales convencionales, como la extrusión, la laminación y la forja.

Varios métodos dentro de la tecnología de SPD se han desarrollado y se siguen desarrollando con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los materiales metálicos mediante un amplio refinamiento del grano. Entre ellos se destacan los siguientes métodos [4-8], la representación esquemática de cada uno de ellos se presenta en la Figura 2.1.

- Torsión a alta presión, HPT (del acrónimo en inglés High Pressure Torsion)
- Forja multidireccional, MDF (del acrónimo en inglés Multi-Directional Forging)
- Unión por laminado acumulativo, ARB (del acrónimo en inglés Accumulated Roll-Bond)
- Corrugado-Planchado Repetitivo, RCS (del acrónimo en inglés Repetitive Corrugation and Straightening).
- Presión en canal angular de igual sección transversal, ECAP (del acrónimo en inglés Equal Channel Angular Pressing)

Nombre del proceso	Representación esquemática	Deformación plástica equivalente
Presión en canal angular de igual sección transversal, ECAP Segal, 1977		$\varepsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \varphi$
Forja multidireccional, MDF Ghosh, 1988		$\varepsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{H}{W} \right)$
Torsión a alta presión, HPT Valiev, 1997		$\varepsilon = \frac{\text{tg } \gamma}{\sqrt{3}}$
Unión por laminado acumulativo, ARB Saito, Tsuji, Utsunomiya, Sakai, 1998		$\varepsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{T}{t} \right)$
Corrugado-Planchado Repetitivo, RCS Zhu, Lowe, Jiang, Huang, 2001		$\varepsilon = \frac{4}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{r+t}{r+0,5t} \right)$

Figura 2.1. Representación esquemática de los métodos de deformación plástica severa mencionados para el refinamiento de grano [2].

En general, los métodos de SPD deben cumplir con ciertos requisitos: Primero, es importante obtener estructuras de UFG con predominio de límites de granos de ángulo alto, ya que sólo en este caso se puede producir cambios apreciables en las propiedades de los materiales. Segundo, es necesaria la formación de nanoestructuras uniforme en todo el volumen de la muestra de manera de producir propiedades estables en los materiales procesados. Tercero, aunque las muestras están expuestas a grandes deformaciones plásticas, no deben presentar daños mecánicos ni grietas [4,24].

La aplicación de los métodos de SPD abrieron la posibilidad de: i) de introducir altas deformaciones en los materiales, ii) de producir materiales a gran escala con baja porosidad o impurezas, y iii) procesar mayores volúmenes del material [24].

2.2. Proceso ECAP

En la práctica, el proceso ECAE es uno de los métodos de SPD que tiene mayor potencial para aplicaciones industriales ya que se logran altas deformaciones en un solo paso a través de la matriz [25].

Como se ilustra en la Figura 2.2. el método ECAP utiliza una matriz especial que contiene en su interior dos canales, uno de entrada y otro de salida, los cuales poseen la misma sección transversal y se interceptan en un ángulo abrupto Φ (típicamente desde tan bajo como 90° hasta tan alto como 150°) y un ángulo adicional Ψ que define el arco de curvatura del punto exterior de la intercepción de los dos canales [8].

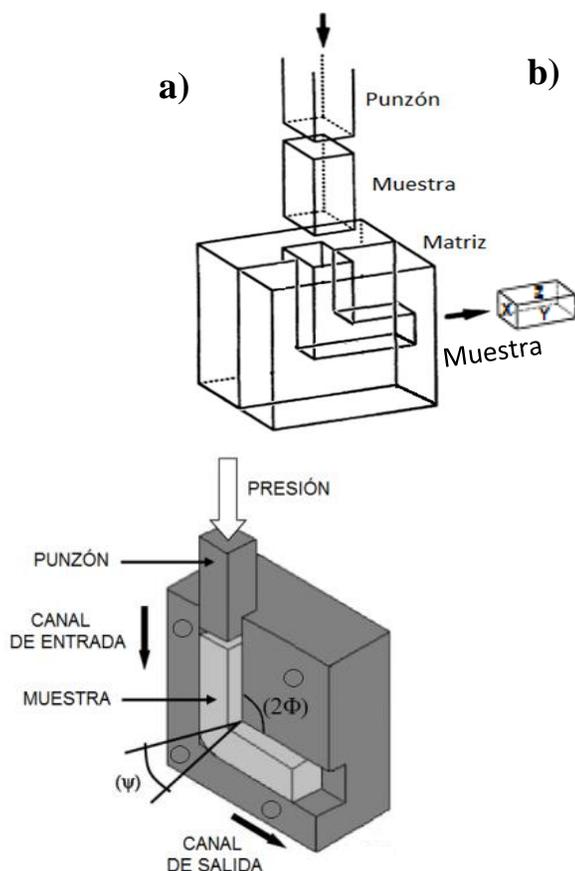


Figura 2.2. (a) Representación esquemática de la matriz ECAP ensamblada, (b) características geométricas del canal de la matriz [26].

El principio del proceso es relativamente sencillo y consiste básicamente en mecanizar una muestra a las dimensiones del canal, luego colocarla bien lubricada en el canal superior y presionarla con un punzón hasta el canal de salida mediante la aplicación de una carga que dependerá de las características mecánicas del material [27].

Durante el procesamiento el material experimenta deformación por cizalladura simple en el plano de simetría a 45° cuando la pieza cambia de dirección al pasar por el plano de intercepción entre los dos canales en presencia de una elevada presión hidrostática [28].

A pesar de la alta deformación impuesta la pieza sale del canal sin experimentar cambios en las dimensiones de la sección transversal. Al no modificarse las dimensiones del

material, este procedimiento puede repetirse varias veces con o sin rotación de la muestra entre pases consecutivos alrededor de su eje de revolución, alcanzándose valores elevados de deformación siempre que el material sea suficientemente dúctil y esté dentro de los límites de “extrusionabilidad” del material.

2.3. Parámetros del proceso ECAP

2.3.1. Deformación por cizalladura simple (γ)

A partir del diagrama que se presenta en la Figura 2.3. se puede deducir la expresión de la deformación por cizalladura simple que se produce en el material durante una pasada en el ECAP considerando ángulos del canal $2\Phi = 90^\circ$ y $\Psi = 0^\circ$ y condiciones ideales de superficies sin fricción y un material plástico perfectamente rígido [8,29]. Como se aprecia en la Figura 2.3. cuando un pequeño elemento de forma cuadrada, etiquetado como abcd, pasa a través del plano de corte OO' , éste se distorsiona en forma de paralelepípedo ($a'b'c'd'$).

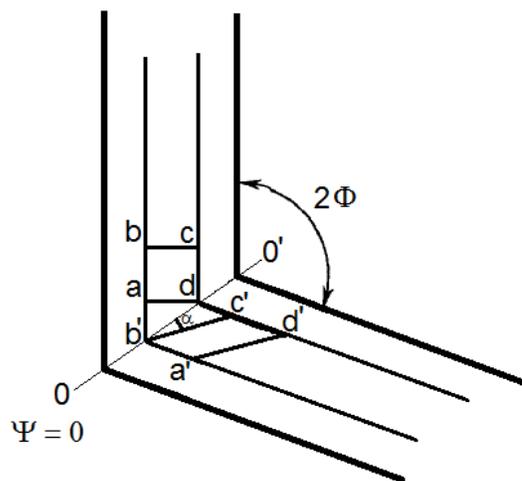


Figura 2.3. Representación esquemática de la distorsión de un elemento cuadrado por cizalladura simple [29].

De la configuración, la deformación de corte o cizalladura simple, γ , queda expresada mediante la relación [8,30]:

$$\gamma = \frac{dc'}{b'd} = \tan \alpha \quad (1)$$

Donde dc' es la deflección del elemento y $b'd$ es la distancia ortogonal sobre el cual ocurre la deflección, α es el ángulo de inclinación del elemento distorsionado respecto al elemento sin deformar.

A su vez:

$$\alpha = \left(\frac{\pi}{2} - \Phi \right) \quad (2)$$

Φ es el semi-ángulo entre los dos canales.

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (1) tenemos que la deformación por cizalladura depende exclusivamente del ángulo de intercepción de los dos canales 2Φ .

$$\gamma = 2 \cotg \Phi \quad (3)$$

Como la deformación por cizalladura se produce capa a capa en el plano de corte, todo el material estará sujeto a una deformación uniforme salvo en pequeñas regiones de los extremos de la probeta [8]. Esto permite evaluar, en cualquier punto de la muestra, los cambios que se produzcan en los elementos estructurales tales como granos y partículas intermetálicas por efecto de la deformación [8].

2.3.2. Deformación plástica equivalente, ε

La energía gastada durante el proceso ECAP es suministrada por la deformación plástica equivalente, ε , y el esfuerzo efectivo, σ . En cuanto a la deformación equivalente, ε , impuesta sobre la muestra en un pase por el extrusor, esta puede ser calculada a partir del criterio de flujo plástico de Von Mises mediante la relación [31]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma \quad (4)$$

Sustituyendo la expresión del esfuerzo de corte, γ (ec. 3) en la ecuación anterior tenemos que en el caso óptimo de fricción nula o baja fricción y ángulo de herramienta $2\Phi = 90^\circ$ la deformación resultante, ε , queda teóricamente también determinada por la geometría del canal, siendo el ángulo de intercepción entre los canales el factor determinante [8]:

$$\varepsilon = \frac{2 \cot \Phi}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Φ es el semi-ángulo entre los dos canales.

Esta expresión muestra que cuanto más agudo es el ángulo de intercepción 2Φ , mayor será la deformación, ya que la función cotangente es decreciente con el ángulo. Esto nos lleva a determinar que la deformación tiene un valor máximo de $\varepsilon = 1,15$ cuando el ángulo de intercepción $2\Phi = 90^\circ$, y un valor mínimo de $\varepsilon = 0,31$ ocurre cuando el ángulo $2\Phi = 150^\circ$ [8].

Como el proceso de extrusión es discontinuo se pueden alcanzar altas deformaciones y efectos estructurales específicos en una misma muestra repitiendo el proceso varias veces sin cambio en la sección transversal de la muestra. En este caso la deformación total equivalente, se obtiene simplemente multiplicando la ecuación (5) por el número de pases, N , en el extrusor:

$$\varepsilon = N \frac{2 \cot \Phi}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Una expresión más refinada propuesta por Iwahashi [29] para la deformación total efectiva, ε , incluye el ángulo de curvatura Ψ de la esquina exterior del canal, el cual por razones geométricas debe tener valores comprendidos entre $\psi = 0^\circ$ y $\psi = \pi - \Phi$. La expresión propuesta para N pases viene dada por:

$$\varepsilon = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (7)$$

2.3.3. Esfuerzo efectivo, σ

De acuerdo con el modelo de Segal y bajo condiciones ideales de extrusión uniforme sin fricción, el esfuerzo efectivo, σ , puede ser determinado a partir del criterio de Von Mises para el inicio de fluencia para materiales dúctiles mediante la siguiente expresión [31]:

$$\sigma = \sqrt{3} K \quad (8)$$

Donde K es el esfuerzo de fluencia del material a procesar.

2.3.4. Presión, P

Igualmente, según el modelo de Segal el análisis mecánico demuestra que la presión, P, requerida para forzar el material a través del canal y la deformación (ε) son función del ángulo 2Φ y del esfuerzo de fluencia (K) del material mediante la relación [8]:

$$\frac{P}{K} = \varepsilon = \frac{2 \cot \Phi}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

De manera, que se requieren presiones del orden del esfuerzo de fluencia del material cada vez que la muestra pasa por el canal, por lo que no será necesario aplicar cargas tan altas para realizar varias extrusiones en la misma muestra.

En la Tabla 2.1. se resumen los valores de la relación p/K y la deformación efectiva, ε , para ocho pases en el extrusor ($N = 8$) y ángulos de herramienta de $2\Phi = 150^\circ$, 120° y 90° y $\psi = 0^\circ$. Como puede verse en la Tabla 2.1. con ángulos más abiertos de 90° es necesario aumentar el número de pasadas para acumular las mismas deformaciones que se obtienen con $2\Phi = 90^\circ$.

Tabla 2.1. Parámetros del proceso ECAP en múltiples extrusiones en matrices de ángulos: $2\Phi = 150^\circ$, 120° y 90° y $\psi = 0^\circ$ [8].

Número de pases	Relación P/K	Deformación efectiva, ε . $2\Phi = 150^\circ$	Relación P/K	Deformación efectiva, ε . $2\Phi = 120^\circ$	Relación P/K	Deformación efectiva, ε . $2\Phi = 90^\circ$

	$2\Phi = 150^\circ$		$2\Phi = 120^\circ$		$2\Phi = 90^\circ$	
1	0.31	0.31	0,66	0,66	1.15	1.15
2	0.31	0.62	0,66	1.33	1.15	2.31
3	0.31	0.92	0,66	2.00	1.15	3.46
4	0.31	1.24	0,66	2.66	1.15	4.62
5	0.31	1.55	0,66	3.33	1.15	5.77
6	0.31	1.86	0,66	4.00	1.15	6.93
7	0.31	2.17	0,66	4.66	1.15	8.08
8	0.31	2.48	0,66	5.33	1.15	9.24

2.4. Rutas de procesamiento por ECAP

Dependiendo de la rotación de la muestra entre pases sucesivos por la matriz ECAP cuatro tipos de rotaciones o rutas de procesamiento se han definido, las cuales se ilustran esquemáticamente en la Figura 2.4. [8,32]:

- Ruta A. la muestra se reintroduce al canal en el mismo sentido con que sale del extrusor, es decir conserva la orientación, rotación 0° .
- Ruta B se divide en dos rutas:
 - Si la muestra se rota 90° en el mismo sentido entre cada pase individual, se denomina Ruta B_C.
 - Si la muestra se rota 90° alternativamente entre cada pase individual se denomina Ruta B_A.
- Ruta C: la muestra se rota 180° entre cada pase individual.

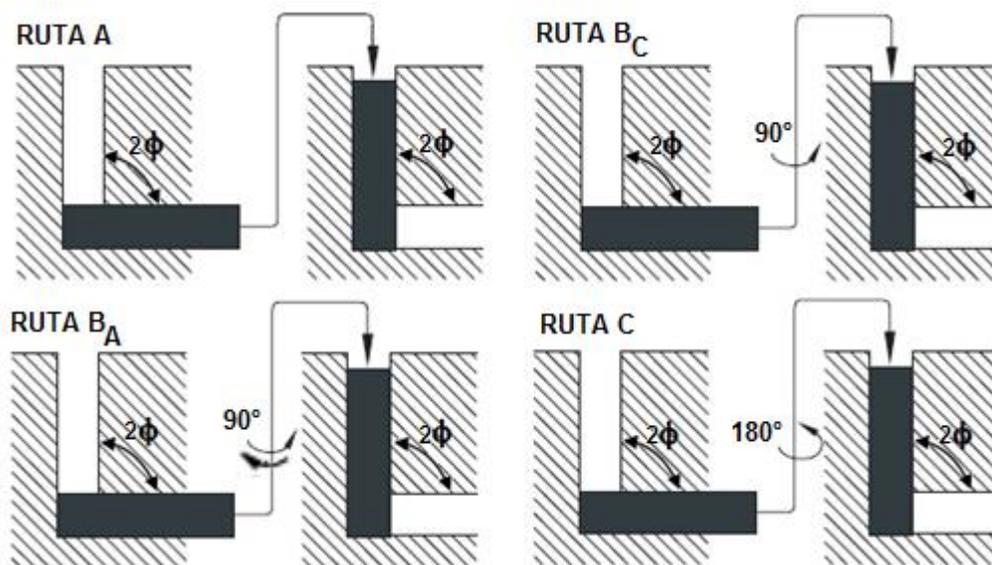
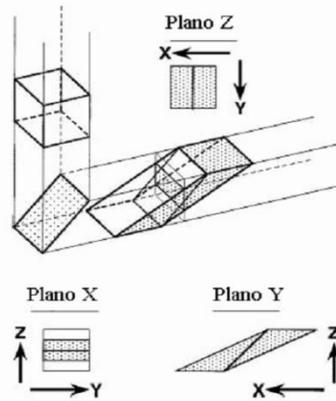


Figura 2.4. Rutas de procesamiento ECAP [32].

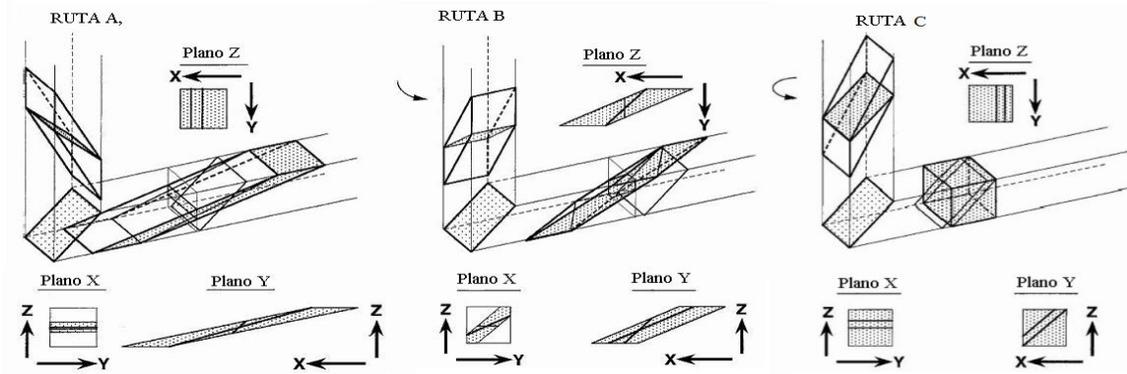
Estos giros entre pases sucesivos contribuyen de alguna forma a cambios internos microestructurales, ya que cada una de estas rutas activará diferentes sistemas de deslizamiento, y dará lugar a conseguir microestructuras uniformes de grano ultrafino con distintas texturas y propiedades mecánicas [3].

La Figura 2.5. presenta ilustraciones esquemáticas de la deformación del elemento cúbico en términos de los planos de corte, para cada uno de los tres planos de corte X, Y y Z. Los insertos muestran las distorsiones de los granos y los sistemas de deslizamiento operativos cuando son observados en los planos X, Y y Z [33,34].

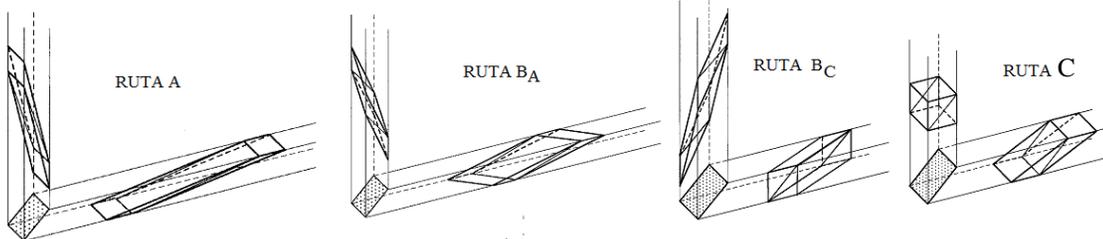
PRIMERA EXTRUSIÓN



SEGUNDA EXTRUSIÓN



TERCERA EXTRUSIÓN



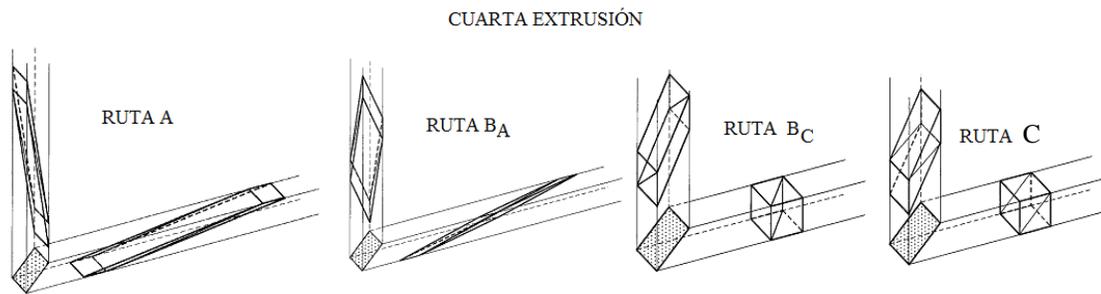


Figura 2.5. Ilustraciones esquemáticas de la deformación del elemento cúbico después de cuatro pases en el ECAP mediante las rutas A, B_A, B_C y C [34].

Como se aprecia en la Figura 2.5. el elemento cubico se deforma diferente para cada ruta de procesamiento con el incremento del número de pases debido a que en cada una de ellas intervienen diferentes planos de deslizamiento. En el caso de la ruta C el elemento cubico se restaura en el segundo y cuarto pase mientras que con la ruta B_C se restaura en el cuarto pase [3].

En resumen, se crean estructuras de grano fuertemente deformadas pero uniformes, estructuras de granos equiaxiales y texturas especiales en todo el volumen de la muestra con estas cuatro rutas de deformación [34-35].

2.5. Factores a considerar para el diseño y fabricación de una matriz ECAP

El diseño y construcción del equipo ECAP para el refinamiento de grano de materiales metálicos exige el cumplimiento de una serie de requerimientos técnicos y prácticos que deben darse simultáneamente para obtener un resultado experimental satisfactorio. A pesar del gran número de trabajos publicados, hay pocos reportes acerca de la metodología empleada para la construcción de la herramienta debido a la complejidad de la técnica. En general, los principales aspectos que se deben tener en cuenta para el diseño y por tanto para la construcción de esta herramienta son los siguientes:

2.5.1. Geometría del canal

La geometría del canal es quizás el factor experimental que afecta en mayor grado el refinamiento del grano debido a que la deformación efectiva impuesta sobre la muestra en cada pase es dependiente del ángulo interno del canal 2Φ y del ángulo de curvatura exterior Ψ . De acuerdo con la ec. 7 cuanto más agudo es el ángulo 2Φ mayor es el grado de deformación conseguida. Con ángulos de curvatura exterior Ψ mayores de 0° la deformación por pase disminuye, además, disminuye la fuerza de la presión de la carga que se ejerce sobre la muestra, pero afecta el nivel y la homogeneidad de la deformación. Por lo que se debe encontrar un compromiso entre la geometría del canal y la homogeneidad de la deformación de manera de obtener un arreglo de granos equiaxiales ultrafinos separados por límites de granos de ángulo alto [36-38].

Aunque el canal puede tener la sección transversal de varias formas, algunas de ellas no son tan prácticas. Los canales cilíndricos, son más fáciles de fabricar que los canales rectangulares, pero presentan problemas en la expulsión de la muestra y en la orientación de la muestra entre pases sucesivos por el canal [29]. Canales para muestras rectangulares satisfacen estas condiciones además de que proveen un procesamiento efectivo para muestras lo suficientemente largas.

También se ha sugerido [29] utilizar canales rectangulares de esquina redondas debido a que se mejora la lubricación de la pared inferior del segundo canal y se reduce ligeramente la presión del punzón. Sin embargo, el modelado de elementos finitos realizado por [39] revela que los canales de esquinas redondas resultan en bajas deformaciones, no uniformidad y redistribución de la deformación por cizalladura en las tres direcciones del proceso, reduciéndose la eficiencia del mismo [35].

Hasta la fecha, no hay consenso respecto a las dimensiones del canal, sin embargo, se reportan en la mayoría de los experimentos longitudes de probetas entre 75 y 100 mm y secciones transversales que oscilan entre 100 y 175 mm² [40]. Por otra parte, algunos investigadores sugieren reducir levemente la sección transversal del canal de salida con el fin de ejercer contra presión a la muestra. Otros prefieren ampliar esa sección con el fin de

reducir la fricción de la muestra con la pared del canal de salida y en consecuencia la presión de la carga [37].

2.5.2. Fricción de contacto

Uno de los principales problemas que confronta el proceso de extrusión por ECAP es la fricción que se produce entre el lingote y el canal de deformación, debido a que las condiciones de fricción no son las mismas en ambos canales como consecuencia de la alta presión ejercida y de la remoción del lubricante a medida que la muestra se desplaza por el primer canal [41-43]. Al igual que otros procesos de conformado de metales la fricción influye en el desgaste de la herramienta y en la carga necesaria para la deformación plástica [41].

Por otra parte, condiciones de alta fricción puede desarrollar zonas metálicas rígidas en la esquina de intercepción del canal, provocando que; i) el material se pegue a la matriz, ii) se eleve la presión del punzón y iii) que se obtenga un pobre acabado de la superficie. Por lo tanto, el control de la fricción mediante la selección de lubricantes, revestimientos de la matriz y el diseño del canal es crítico para el procesamiento ECAP [44].

Por lo general, la lubricación del canal y la muestra se hace con grasa sintética a base de bisulfuro de molibdeno (MoS_2), ya que es uno de los lubricantes sólidos más reconocidos por su eficiencia en la reducción de la fricción y por su capacidad para trabajar en sistemas de baja velocidad y alta carga. Se recomienda limpiar cuidadosamente el canal después de cada pase, particularmente cuando la deformación se lleva a cabo a altas temperaturas ya que se pueden desprender vapores alrededor de los 250° . Por lo tanto, es esencial una buena ventilación y protección del operador [38].

2.5.3. Temperatura del proceso

El proceso ECAP es susceptible de realizarse a diferentes temperaturas, lo que facilita la extrusión de aquellos materiales que no pueden ser extruidos a temperatura ambiente. Para este propósito la matriz es provista de un sistema de calefacción y termopares para

monitorear la temperatura del material durante el ensayo y el requisito para la deformación es mantener la temperatura lejos de la temperatura de revenido del acero utilizado para la fabricación de la matriz [40]. Debido a la dificultad experimental que esto conlleva, pocos estudios se han llevado a cabo para estudiar el efecto de la temperatura, a la que se realiza la deformación, sobre la microestructura del material y actualmente sigue siendo un tema de interés.

2.5.4. Presión del punzón

Una de las ventajas del proceso ECAP es que no son necesarias presiones demasiado altas para el proceso de extrusión. Con prensas hidráulicas estándar del orden de 50 toneladas, como máximo, es suficiente. Por lo que, se debe dimensionar la carga máxima de la matriz en función de los materiales a extruir, teniendo en cuenta que la presión de empuje debe ser del orden de la tensión de fluencia del material [45].

El punzón es la pieza más complicada y, a la vez crítica, ya que será la pieza que transmitirá la fuerza para llevar a cabo la extrusión de la probeta. Se deben estimar dimensiones (longitud/área de la sección transversal) para evitar que se pandee durante la extrusión o en el peor de los casos que se fracture por problemas de sobrecarga. Se debe diseñar a partir de los dispositivos que serán utilizados para instalarlo en la celda de carga de la máquina de ensayo universal o prensa hidráulica [41].

2.5.5. Velocidad de extrusión

Generalmente el proceso de deformación ECAP se realiza tanto con máquinas de ensayo universal como con prensas hidráulicas de alta capacidad que operan con relativamente altas rampas de velocidades con poco o ningún control sobre la velocidad de prensado, por lo que no ha habido una evaluación profunda de la influencia de la velocidad de prensado en el proceso ECAP.

Sin embargo, el estudio realizado en muestras de aluminio puro y muestras de una aleación Al-Mg deformadas utilizando una máquina de ensayo universal a velocidades de prensado

entre $\sim 10^{-2}$ a 10 mm s^{-1} muestra que las velocidades de prensado utilizadas no influyen significativamente en el tamaño de grano de equilibrio obtenido. Sin embargo, tiene efecto en la naturaleza de la microestructura debido a que a bajas velocidades de deformación hay más tiempo disponible para recuperar la estructura, resultando en una microestructura más homogénea [46].

2.5.6. Material

Para la fabricación de la matriz y el punzón se debe seleccionar un acero de alta calidad y una de las mejores opciones es el acero AISI H13 y la aleación de Cr-V-Mo que probablemente es la más popular dentro de las aleaciones para herramientas trabajadas en caliente. Otra alternativa es utilizar un acero AISI H11 o una aleación de carburo de wolframio [38,47].

Por lo general, los canales son mecanizados por electroerosión seguido de un pulido manual con cintas abrasivas de SiC (números desde 320 a 1200), de manera de proporcionar una rugosidad superficial de $0,05 \mu\text{m}$. Luego de elaborar los canales los bloques deben ser sometidos a tratamientos térmicos, dependiendo del material utilizado, con el fin de evitar alcanzar su máxima dureza, pueden formarse grietas en los bloques durante la extrusión [38].

Después de los tratamientos térmicos los canales son nitrurados o carbonitrurados; esto ayuda a reducir la fricción entre el lingote y las paredes del canal lo que a su vez reduce la fuerza ejercida. Finalmente, se les realiza un pulido final con cintas abrasivas de SiC (números 400, 600 y 1200) para eliminar las imperfecciones superficiales resultantes de los tratamientos a los que han sido sometidos [37-38].

Por otra parte, los dos bloques llevan mecanizado en el interior entre tres y seis orificios para encajarlos perfectamente mediante elementos de unión (pernos o espárragos) y entre cuatro y seis orificios en la cara exterior con su correspondiente tolerancia para cerrar correctamente la matriz mediante tornillos, los cuales deben ser seleccionados y certificados de que cada uno de ellos tenga el mismo torque. Este es un detalle importante ya que la matriz se puede abrir durante la extrusión sino cierra correctamente. A su vez,

cada bloque lleva en la parte superior dos ranuras para facilitar la separación de los dos bloques al momento de abrirla.

2.6. Microestructura típica de los materiales de granos ultrafinos

Los materiales de granos ultrafinos producidos por técnicas de deformación plástica severa con tamaño de grano en el rango submicrométrico (100 a 1000 nm) o manométrico (menor de 100 nm) se caracterizan por poseer una alta población de límites de grano en comparación con los materiales de grano grueso [48]. Estos límites de grano varían apreciablemente dependiendo de los regímenes y rutas de procesamiento utilizados durante la extrusión y pueden pertenecer a límites de: ángulo bajo (desorientaciones menores de 15°), límites de ángulo alto (desorientaciones mayores a 15°) en equilibrio y no equilibrio debido a la presencia de numerosos defectos atómicos en su estructura [48]. Los límites de grano de ángulo alto en estado de no equilibrio se caracterizan por presentar un exceso de energía y tensiones elásticas de largo alcance causadas por la alta densidad de dislocaciones dentro de los granos y en los límites de los granos [4,48].

La característica principal de la estructura de UFG en estado de no equilibrio es que la mayoría de los límites son diferentes y no están bien definidos. Como regla general aparecen curvos u ondulados en lugar de rectos, asociado con la alta distorsión de la red cristalina. Estos límites de grano pueden ser controladas mediante subsecuentes recocidos y/o tratamientos termomecánicos especiales [4].

Un ejemplo típico de una estructura de UFG se muestra en la Figura 2.6. donde se presentan micrografías por MET de la aleación Al-4%Cu-0.5%Zr con un tamaño de grano de 200nm después de deformada por ECAP ($\epsilon = 7$) (Figura 2.6.a.) y después de recocida a una temperatura de 160°C por una hora (Fig. 2.6.b.) [49]. En ambos casos se observa una estructura de tipo granular con límites de grano de ángulo alto con desorientaciones aleatorias. Los límites de grano en la Figura 2.6.a. se distinguen claramente de los límites de grano de la Fig. Figura 2.6.b. por la fuerte difusión del espesor de los contornos de extinción dentro de los granos, lo cual es distintivo de los límites de grano en estado de no

equilibrio y que se ha vinculado con tensiones elásticas y distorsiones de la red cristalina cerca de los límites de grano [49].

Esta fuerte difusión del espesor de los contornos de extinción ha sido observada en diferentes materiales de UFG [50]. Luego del recocido, la estructura presenta casi el mismo tamaño de grano, pero sin tensiones internas y con un típico contraste de bandas en los límites de grano (Figura 2.6.b.), que a menudo se asocia con cierto crecimiento de grano [49].

En resumen, los límites de grano en materiales nanoestructurados procesados por métodos de deformación plástica severa se caracterizan por distorsiones significativas de la red cristalina cerca de los límites de grano, una alta densidad de dislocaciones y defectos en los límites de grano, así como una configuración ondulada de los límites de grano que certifican su estado de no equilibrio.

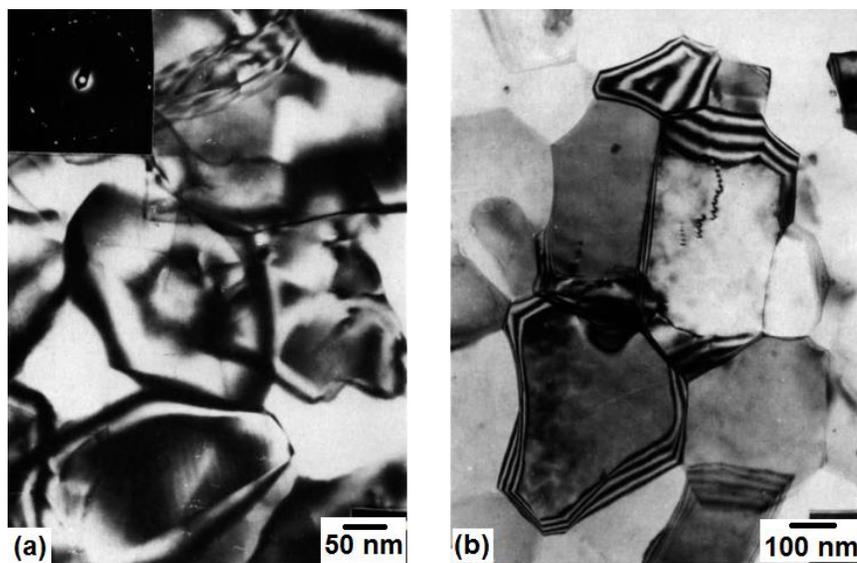


Figura 2.6. Micrografías por MET de la aleación Al-4% Cu-0.5% Zr: (a) después de deformación severa ($\epsilon = 7$) y (b) después del recocido a 106 °C durante 1 h [49].

2.7. Propiedades mecánicas

2.7.1. Resistencia y ductilidad

Es bien conocido que la deformación plástica inducida por métodos de conformado convencionales como laminación, estirado y extrusión puede aumentar significativamente la resistencia de los metales y aleaciones. Sin embargo, este aumento generalmente va acompañado de una pérdida de ductilidad. La resistencia y la ductilidad son las propiedades mecánicas principales de cualquier material, pero generalmente son características opuestas. Los materiales pueden ser fuertes o dúctiles, pero raramente ambos a la vez.

A pesar de esta limitación, resultados experimentales han demostrado que el procesamiento por deformación plástica severa es capaz de producir materiales que combinan alta resistencia y alta ductilidad. Este comportamiento inusual se ha atribuido específicamente al desarrollo de nanoestructuras únicas con alta densidad de límites de granos de ángulo alto en desequilibrio durante el proceso de deformación [4,51]. La excepcional combinación de alta resistencia y alta ductilidad se observó primero en muestras de Cu y Ti, ambas de alta pureza procesadas por ECAP y HPT- torsión por alta presión, respectivamente, como se ilustra en la Figura 2.7. [52].

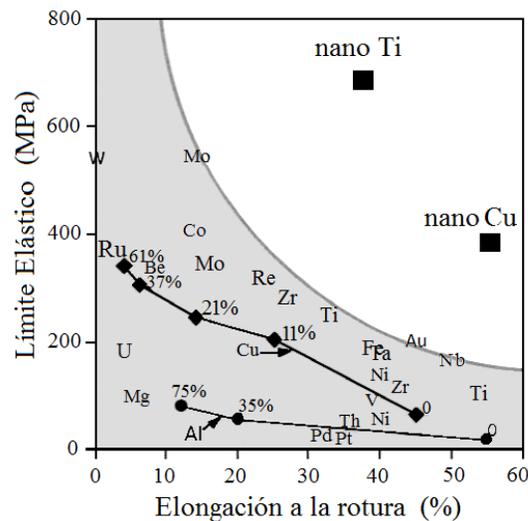


Figura 2.7. Comparación de la resistencia y ductilidad de metales nanoestructurados y de grano grueso [52].

2.7.2. Superplasticidad

La producción de materiales con tamaño de grano submicrométrico por deformación plástica severa crea una oportunidad para desarrollar propiedades superplásticas en ciertos materiales. Por ejemplo, se ha reportado superplasticidad a altas tasas de deformación en dos aleaciones de Al después de procesadas por ECAP. La aleación clásica Supral 100 (Al-6Cu-0.4Zr) en la que se obtuvo un tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m}$ y elongaciones de 970% (a $10^{-2}/\text{s}$ y $300 \text{ }^\circ\text{C}$) después de procesada ocho veces consecutivos a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ y en la aleación rusa 1420 (Al-5.5Mg-2.2Li-0.12Zr) que se obtuvo un tamaño de grano de $1,2 \mu\text{m}$ y alargamientos de 1180% (a $10^{-2}/\text{s}$ y $350 \text{ }^\circ\text{C}$) y 910% (a $10^{-1}/\text{s}$) [53]. También se ha reportado superplasticidad en otras aleaciones, como la aleación Al-7034, varias aleaciones de Mg y en una aleación comercial AA2024 [54-55].

2.8. Aplicaciones del método ECAP

Una de las aplicaciones importante de este proceso se encuentra en la industria de implantes médicos. Hoy en día se ha logrado fabricar implantes de cadera, rodilla, así como varios tornillos, placas y mallas con todas las características de diseño y propiedades que requieren los implantes, utilizando titanio nanoestructurado procesado por ECAP (Figura 2.8) [56-57]. También se ha utilizado para la fabricación de pernos de aleaciones de titanio y micropernos de acero al carbono, los cuales se usan ampliamente en las industrias del automóvil y la aviación [58].

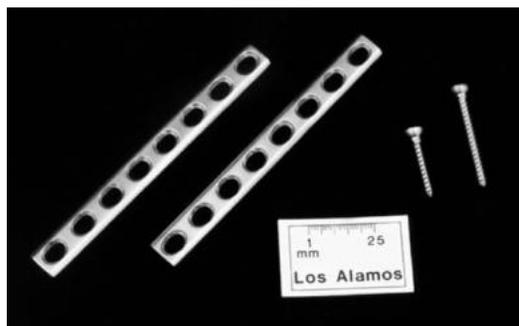


Figura 2.8. Placa para osteosíntesis ósea de Ti nanoestructurado [57].

La fabricación de blancos de hasta 300 mm de diámetro para sputtering de Al y Cu producidos a partir de placas de granos ultrafinos procesadas por ECAP, así como barras de Ti de aproximadamente 50 mm de diámetro y 170 mm de longitud (Figura 2.9.) han sido otras de sus aplicaciones. Los blancos de granos ultrafinos proporcionan mayor uniformidad de la película depositada, baja cantidad de partículas y mayor tiempo de vida útil [56].



Figura 2.9. Barra de Ti procesada por ECAP. Tamaño en pulgadas [57].

También se ha logrado producir dispositivos metálicos de amortiguamiento sísmico de alto desempeño, así como la producción de piezas complejas aplicables a la industria automotriz, equipos deportivos y componentes arquitectónicos [57]. Estas y otras aplicaciones muestran la importancia de transformar las técnicas ECAP en operaciones industriales rentables y competitivas.

Capítulo III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la metodología empleada para cumplir con los objetivos planteados en la investigación. Se inicia con la técnica de extrusión por presión en canal angular de sección constante (ECAP), en términos de diseño, construcción e instalación del equipo en la máquina de ensayo universal, así como del procedimiento utilizado para poner a punto el equipo. Posteriormente, se describe la preparación de las muestras para su observación por microscopía óptica y medidas de microdureza Vickers.

3.1. Fabricación del equipo de extrusión ECAP

El equipo de extrusión por ECAP, desarrollado y patentado por Segal [8,27], consiste esencialmente de un punzón, que es el que transmite la carga a la pieza durante la extrusión, y una matriz constituida de dos bloques simétricos perfectamente acoplados. Cada uno de estos bloques lleva mecanizado en la cara interna un canal rectangular en forma de “L” de igual sección transversal interceptados a un ángulo $\Phi = 90^\circ$ y con un ángulo de curvatura exterior de $\psi = 0^\circ$ en el punto de intercepción de los dos canales, como se aprecia en la Figura 3.1.

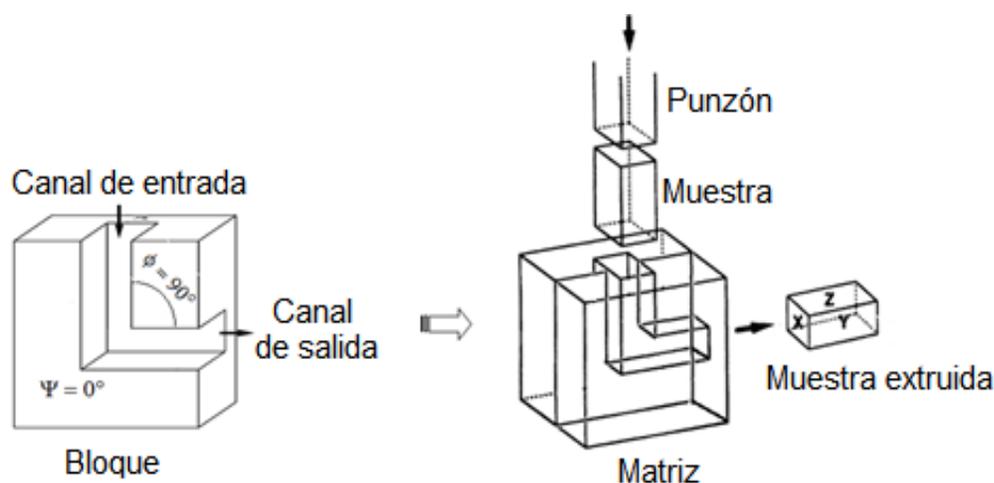


Figura 3.1. Esquemas de la geometría de los dos bloques y de la matriz ECAP ensamblada propuesta por Segal [8,27]

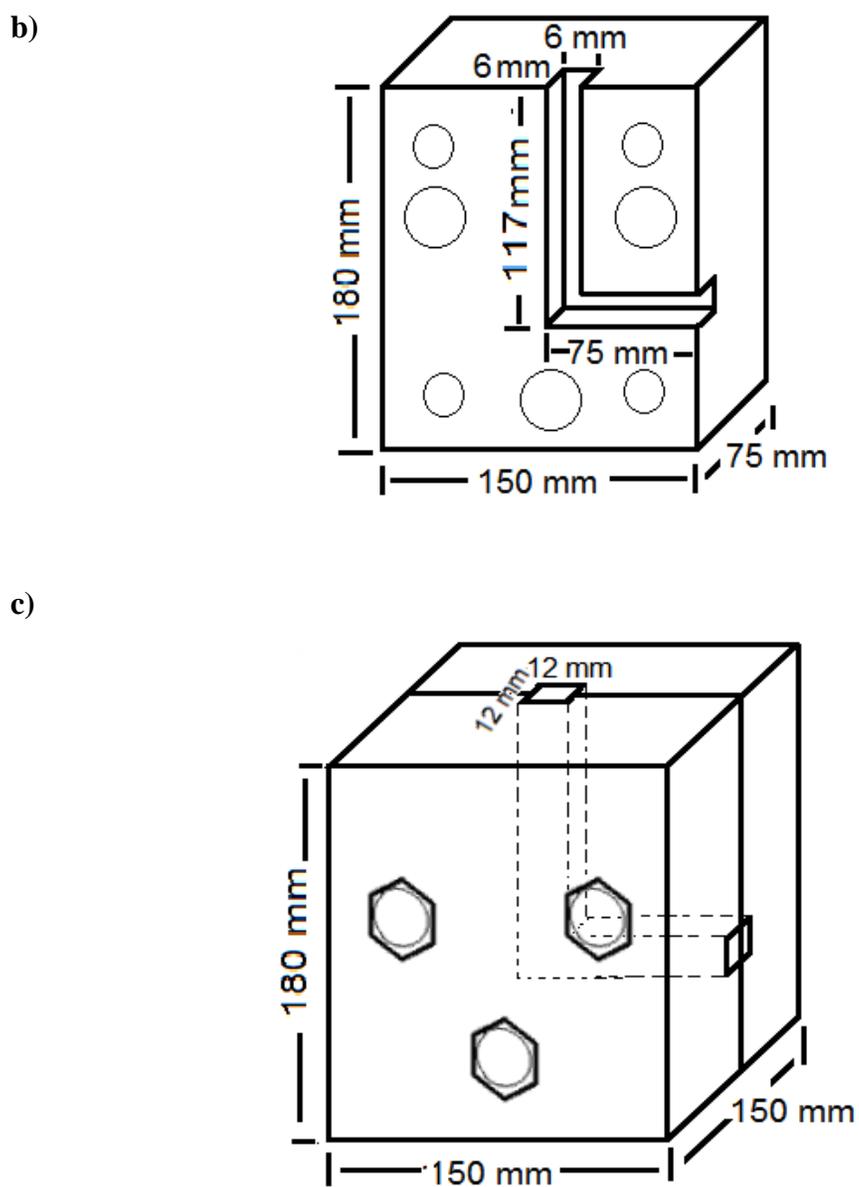


Figura 3.2. Esquemas con las medidas del punzón (a), de los bloques (b) y de la matriz ensamblada (c)

Se utilizaron piezas rectangulares macizas de acero AISI 4140 (Cr-Mo) para fabricar los dos bloques que constituyen la matriz y el punzón. El punzón es el que presiona la probeta, por tal motivo es muy importante que este resista la flexión. Si el punzón flexiona, el empuje tendría distorsión y como consecuencia ocurriría un empotramiento en

el canal de la matriz. El acero AISI 4140 es uno de los aceros de baja aleación más populares por sus buenas propiedades mecánicas necesarias para la elaboración de piezas que son sometidas a grandes esfuerzos. Este tipo de acero tiene también una muy buena resistencia al desgaste.

En la Figura 3.3a-d se aprecia uno de los bloques de acero, el mecanizado del canal en forma de “L” en la cara interna del bloque, los bloques con los orificios para los pernos que sirven de guía para acoplar la matriz. Posteriormente, se mecanizaron en cada bloque tres orificios para los tornillos que cierran la matriz. Una vez elaborados los bloques y el punzón, estos se sometieron a un tratamiento de temple a una temperatura de $T = 850^{\circ}\text{C}$, seguido de enfriamiento en aceite para alcanzar una dureza Brinell de 341 HB, luego se le hizo un revenido a una temperatura de $T = 250^{\circ}\text{C}$ enfriado en el horno para liberar tensiones, con efecto mínimo sobre la dureza.

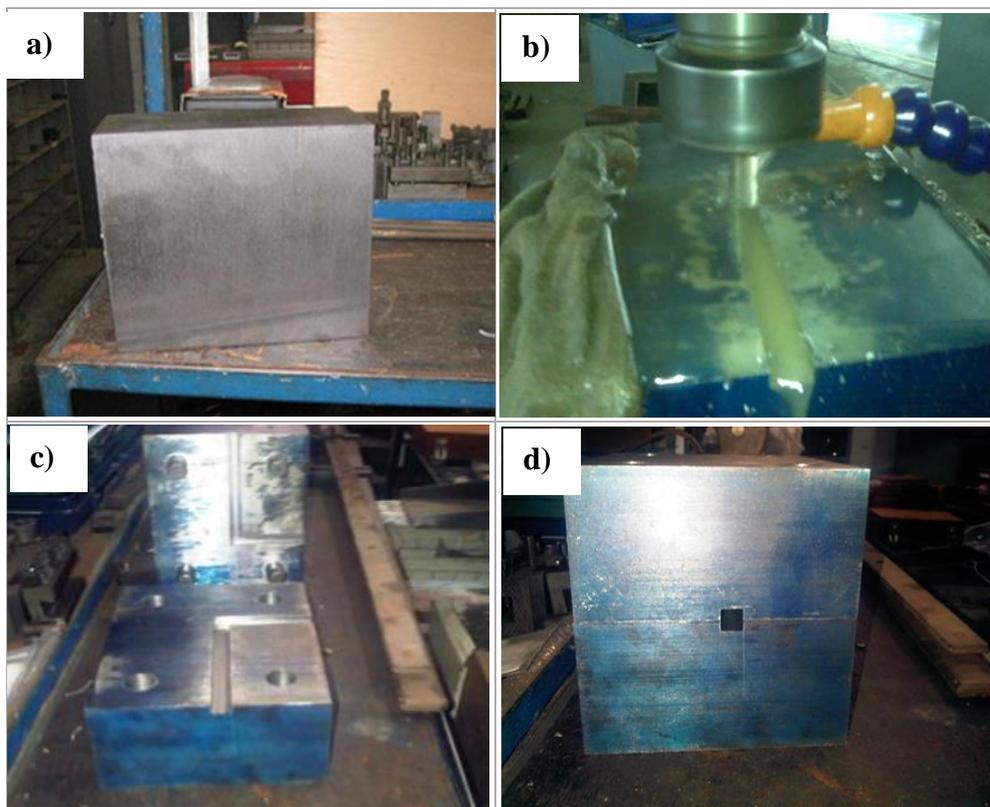
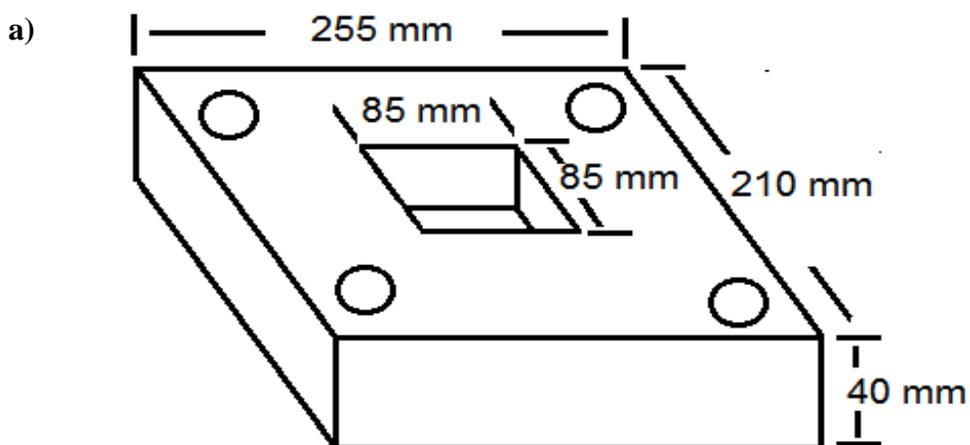


Figura 3.3. a) Pieza de acero, b) mecanizado del canal, c) vista de los bloques con el canal y orificios mecanizados y d) bloques acoplados

También, se elaboró una tapa para ayudar a mantener unidos los bloques durante el proceso de extrusión y una base para poder sostener y ajustar la matriz en la máquina de ensayo, ambos contruidos de acero al carbono ASTM A38 laminado a un espesor de $\frac{3}{4}$ ". La base y la tapa se acoplan con tornillos como se aprecia en la Figura 3.4 en la que además se presentan esquemas con las dimensiones de la base y la tapa. El peso de estas piezas se indica en la Tabla 3.1.

Los pernos, los tornillos y las tuercas se elaboraron con acero al carbono templable AISI 1045, adecuado para todo tipo de aplicaciones donde se requiera soportar esfuerzos por encima de los 87.000 psi o en casos donde se necesite una dureza media dentro de los 170 a 206 HB.



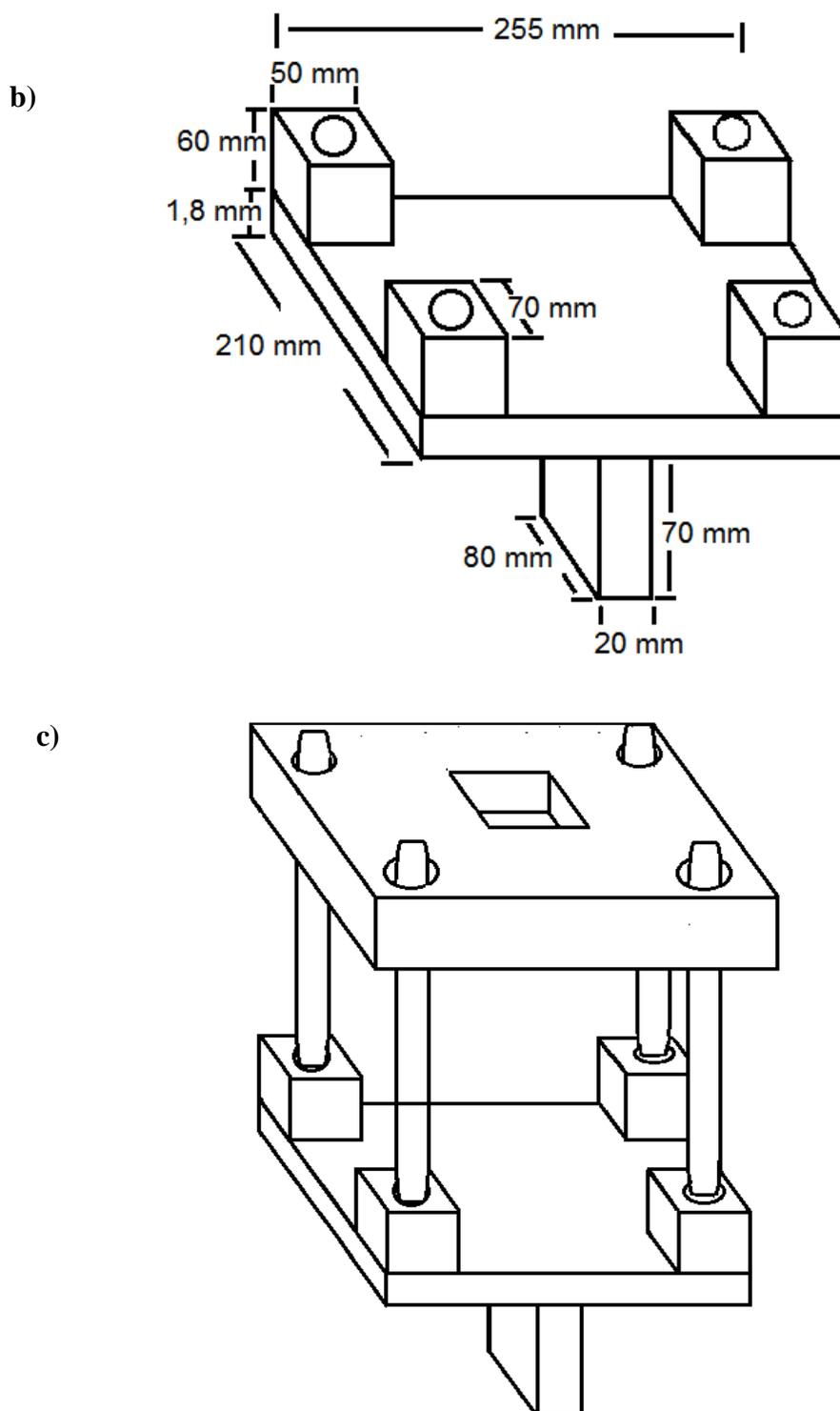


Figura 3.4. Esquemas con las medidas de: a) tapa, b) base y c) base y tapa conectadas con tornillos

Tabla 3.1. Masa de las piezas que conforman el equipo ECAP

Pieza	Masa (Kg)
Punzón	2
Matriz ensamblada con pernos, tornillos y tuercas	29
Base con tornillos y tuercas	14
Tapa	5

3.2. Instalación del equipo ECAP

Para el acoplamiento del equipo ECAP a la máquina de ensayo, se creó una aplicación en modo compresión con el programa TestXpert II, el cual forma nexo de comunicación entre la máquina de ensayo y el computador. La aplicación incluye los parámetros como la distancia que debe recorrer el punzón dentro del canal antes de detenerse, la velocidad de extrusión, la velocidad con la que el punzón abandona el canal y las dimensiones del lingote, entre otras.

Para la instalación del equipo ECAP en la máquina de ensayo universal Zwick/Roell se procedió de la siguiente manera:

- Se colocó el punzón en la mordaza de sujeción superior y la base que sostiene la matriz ECAP en la mordaza inferior de la máquina de ensayo Zwick/Roell.
- Luego se dispuso la matriz ECAP en la base y se ensambló con la tapa mediante cuatro tornillos.
- Con la aplicación preestablecida en el programa TestXpert II se verificó la alineación del punzón con el canal de entrada de la matriz ECAP, así como otros parámetros relacionados con el ensayo de extrusión.

3.3. Material y dimensiones de los lingotes

El material utilizado en esta investigación fue un tocho de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada con la composición química que se presenta en la Tabla 3.2. De este tocho se cortaron piezas y se mecanizaron 30 lingotes rectangulares con las dimensiones del canal de la matriz ECAP de 11,7 mm x 11,7 mm de sección transversal y

de 117 mm de longitud, tanto para la puesta a punto del equipo como para los ensayos de extrusión a evaluar. Seguidamente, se realizó una inspección visual a cada lingote para confirmar que estos estuviesen completamente rectos y que no presentaran daños superficiales apreciables (Figura 3.5).

Tabla 3.2. Composición química (% en masa) de la aleación Al-Mg-Si-0,15%La determinada por Fluorescencia de Rayos-X

Elementos (% en masa)						
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni
98,41	0,42	0,20	0,0015	0,0040	0,50	0,0025
Zn	Ti	V	Na	Zr	La	
0,0020	0,01	0,01	0,05	0,0030	0,14	

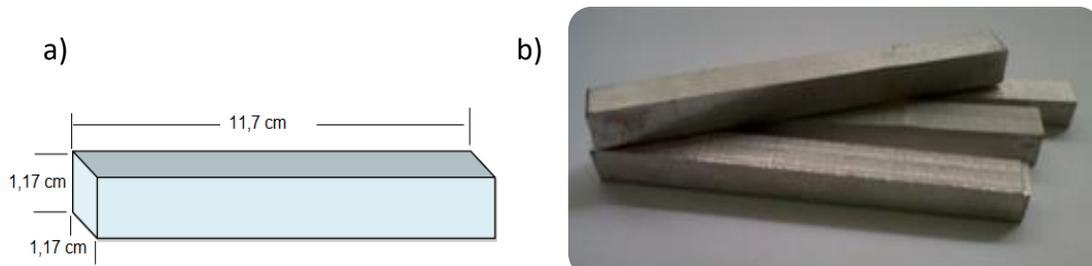


Figura 3.5. (a) Esquema de las dimensiones de los lingotes para el proceso de extrusión, (b) lingotes mecanizados

3.4. Procesamiento ECAP y puesta en funcionamiento

1. Previo a la instalación del equipo ECAP a la máquina de ensayo universal se lubricó el canal de la matriz, el lingote y el punzón con grasa sintética a base de bisulfuro de molibdeno (MoS_2), ya que es uno de los lubricantes más reconocidos por su eficiencia en la reducción de la fricción y por su capacidad para trabajar en sistemas de baja velocidad y alta carga.

2. Se ensambló el equipo ECAP en la máquina de ensayo universal y se verificó la alineación del punzón con el canal de entrada de la matriz ECAP.
3. Se colocó el lingote en el canal de entrada del ECAP.
4. Luego se verificó la rutina de trabajo establecida previamente y se introdujeron los datos del lingote al programa TestXpert II.
5. Con los parámetros definidos y la máquina preparada se dio inicio al ensayo presionando el lingote con el punzón mediante la aplicación de una carga ejercida por la máquina de ensayo, hasta que el lingote pasara del canal de entrada al canal de salida. Una vez terminado el ensayo se guardó la data y la gráfica registradas durante el ensayo de extrusión.
6. Luego se retiró el punzón del canal de entrada y se extrajo el equipo ECAP de la máquina de ensayo.
7. Se separaron los dos bloques que conforman la matriz y se retiró el lingote ya extruido.

Para continuar extruyendo el mismo lingote se procedió de la siguiente manera:

1. Se removió la grasa del lingote previamente extruido, se cortaron los extremos y se eliminaron los bordes afilados que se pudieron haber formado durante la extrusión. En este trabajo se decidió prescindir de los extremos del lingote entre cada pase por el ECAP (Figura 3.6) debido a la deformación heterogénea que sufren estas regiones durante la deformación aplicada [40].

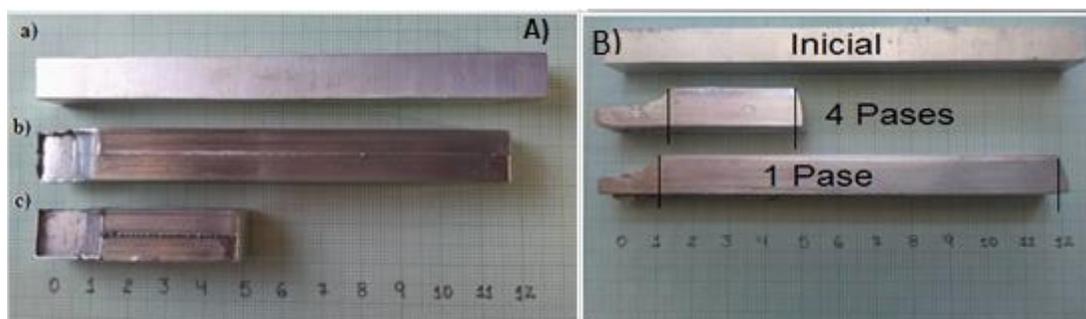


Figura 3.6. Fotografías mostrando: (A) vista superior de: a) lingote sin extruir, b) lingote con 1 Pase y c) lingote con 4 Pases sucesivos en el ECAP. (B) vista lateral de los lingotes mostrando claramente la cuña que se forma en el plano de cizalla y los cortes realizados a los lingotes después de cada pase en la matriz ECAP

2. Luego de cortar los extremos del lingote y de eliminar los bordes afilados se lubricó nuevamente el lingote, el canal de la matriz y el punzón.
3. Se ensambló e instaló nuevamente el equipo ECAP a la máquina de ensayo.
4. Se colocó el lingote en el canal de entrada asegurándose que estuviese rotado 90° con respecto a su eje longitudinal en sentido contrario al de las agujas del reloj (Ruta Bc).
5. Se repitieron los pasos anteriores del 4 al 7.

La Figura 3.7 presenta esquemas de la secuencia del proceso de extrusión.

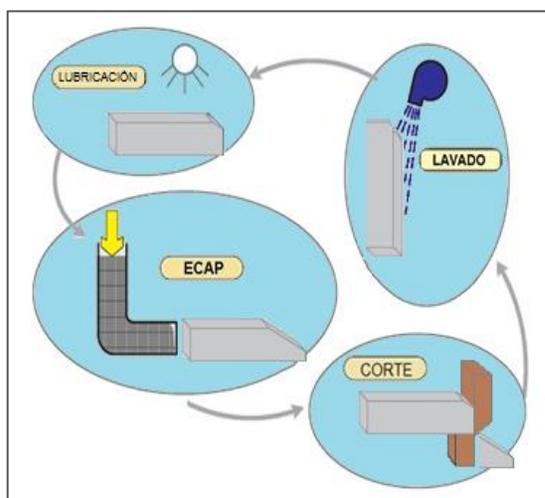


Figura 3.7. Secuencia del proceso de extrusión [40]

Las principales limitaciones del proceso de extrusión ECAP son la longitud restringida del punzón debido a efectos de pandeo, y que es necesario abrir y cerrar la matriz cada vez que se hace un ensayo de extrusión, siendo por lo tanto un proceso discontinuo y lento.

3.5. Condiciones del ensayo

Todos los ensayos de extrusión se llevaron a cabo a temperatura ambiente con una velocidad del punzón de 1 mms^{-1} y la ruta de procesamiento B_C , que consiste en rotar el lingote 90° alrededor de su eje longitudinal cada vez que se pasa el lingote por el canal [32,59], como se ilustra en la Figura 3.8.

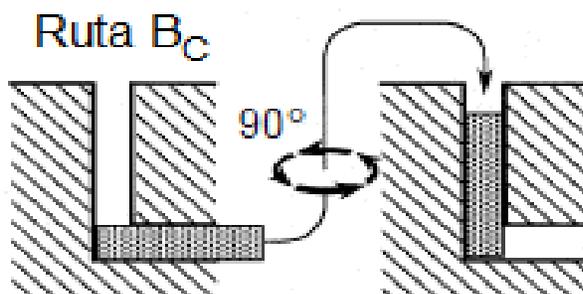


Figura 3.8. Esquema de la rotación del lingote correspondiente a la Ruta de procesamiento B_C [32]

3.6. Caracterización por microscopía óptica de la microestructura de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La antes y después de procesada por ECAP

3.6.1. Preparación de las probetas y equipos utilizados

Como se mencionó en el apartado 3.3. el material utilizado en este trabajo fue un tocho de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La. Para el análisis metalográfico se cortaron muestras de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada mientras que en los lingotes procesados con 1, 2, 3 y 4 pases consecutivos en la matriz por ECAP se cortaron muestras del plano longitudinal (Plano Y) y del plano de la dirección de la extrusión (Plano Z), como se esquematiza en la Figura 3.9. Seguidamente se prepararon siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E3 [60], que consiste en embutir la muestra en resina epóxica y luego realizar en la superficie descubierta un desbaste grueso con lijas de

carburo de silicio, SiC, en secuencia numérica ascendentes desde 240 hasta 1200. Luego de este desbaste se realizó un pulido intermedio con alúmina de $5\mu\text{m}$ y óxido de magnesio de $2\mu\text{m}$ y un pulido final con hidróxido de magnesio utilizando paños Lecloth y agua destilada como lubricante hasta obtener una superficie especular libre de rayas y defectos. Entre cada pase del pulido, las muestras fueron lavadas con abundante agua a fin de remover cualquier residuo del abrasivo anterior.

Al finalizar el pulido, las muestras fueron atacadas químicamente con una solución fresca de HF al 1% en volumen por un tiempo de 6 min, con el fin de revelar la estructura granular. Este reactivo es recomendado para las aleaciones de aluminio de la serie 6xxx [61].

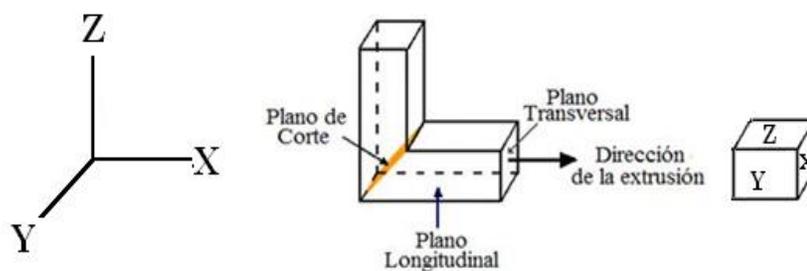


Figura 3.9. Representación esquemática del canal de la matriz ECAP mostrando los tres planos ortogonales X, Y y Z en la muestra procesada

Para la determinación del tamaño de grano de las muestras en estado de colada y las extruidas por ECAP se tomaron 5 micrografías a una magnificación de 50X escogidas al azar. Cada micrografía representa un campo de observación en el microscopio óptico y cubre un área de análisis de $113568,1\ \mu\text{m}^2$. Por lo que, para cinco campos de observación el área de análisis es de $567840,5\ \mu\text{m}^2$.

En cada campo de observación se obtuvo el área, la longitud máxima y tres medidas del ancho de cada uno de los granos (Figura 3.10). El tamaño promedio de grano se determinó de la data del área de los granos según la norma ASTM E112 [62] y es expresado como el diámetro de un círculo de área equivalente.

Con la longitud máxima (L_M) y el promedio del ancho (A_m) se calculó el aspecto de radio (r), como medida de la elongación de los granos, mediante la siguiente expresión: $r = \frac{L_M}{A_m}$. En este sentido, se acordó que razones cercanas o mayor a diez corresponden a granos elongados, mientras que cuando son próximas a la unidad, son indicativos de granos con morfologías más equiaxiales.

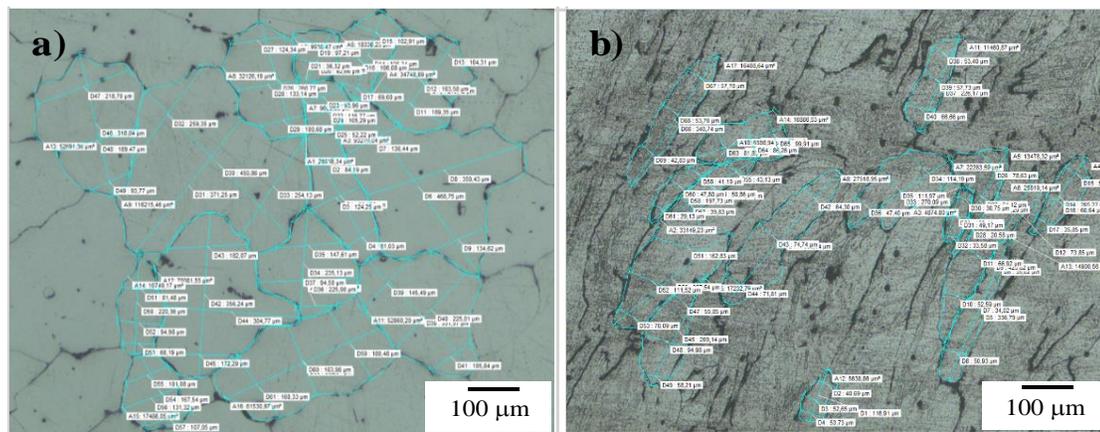


Figura 3.10. Micrográficas ópticas ilustrando granos delineados y medidas de la longitud y ancho de cada uno de ellos. a) granos equiaxiales (aleación Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada) y b) granos elongados (aleación Al-Mg-Si-0,14%La extruida tres veces consecutivas en la matriz ECAP)

Para realizar los cortes se utilizó una cortadora de precisión Leco VC-50 con disco diamantado perteneciente al Laboratorio de Caracterización de Materiales del IIBCAUDO de la Universidad de Oriente y la cortadora IsoMet marca Buehler del Centro de Investigación en Ciencia de los Materiales de la Universidad Nacional Experimental de Guayana, Puerto Ordaz. El pulido con acabado tipo espejo se llevó a cabo en una pulidora semiautomática Ecomet-2 marca Buehler. La captura de las imágenes y las medidas del tamaño de grano se llevaron a cabo en un microscopio metalográfico Nikon Eclipse MA 200, el cual tiene acoplado el analizador de imágenes OmniMet 9.9. Tanto la pulidora Ecomet-2 como el microscopio Nikon se encuentran ubicados en Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales de CVG-Sidor, Puerto Ordaz.

3.7. Caracterización mecánica – Microdureza Vickers

3.7.1. Preparación de las muestras y equipo utilizado

Para los ensayos de microdureza Vickers se cortó una muestra de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada y muestras del plano de la dirección de la extrusión (Plano Z) de los lingotes extruidos en el ECAP con 1, 2, 3 y 4 pases. Posteriormente, se desbastaron cuidadosamente hasta obtener muestras completamente planas de aproximadamente 2 mm de espesor y de buen acabado superficial de manera de asegurar una huella sin distorsión para mayor exactitud en las medidas. En cada una de las muestras se realizaron diez identaciones con una carga de 100 gf durante 10 segundos en puntos seleccionados al azar siguiendo la norma ASTM E384 [63], reportando el promedio de estas medidas como el valor de la microdureza Vickers.

Se utilizó el microdurómetro digital Wilson Hardness Tukon 1202 equipado con un indentador piramidal de diamante Vickers, el cual se encuentra ubicado en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales de CVG-Sidor, Puerto Ordaz.

Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

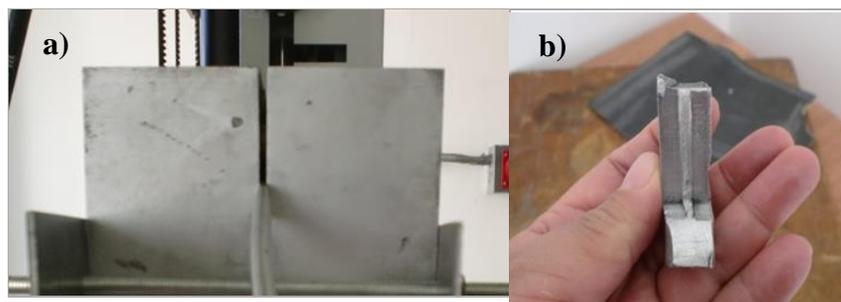
CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Fabricación y puesta en funcionamiento de un equipo de extrusión por presión en canal angular de sección constante (ECAP)

En la Figura 4.1. se muestra el equipo de extrusión ECAP fabricado con base a la configuración y dimensiones de la máquina de ensayo universal Zwick Roell Z250. A pesar de su robusta construcción durante la puesta a punto los bloques tendían a separarse como se muestra en la Figura 4.1.(a), esto ocasionaba que el material fluyera por la abertura entre los dos bloques formándose una gran cantidad de rebaba en el lingote, como se aprecia en la Figura 4.1.(b), a la vez que se incrementaba la presión de trabajo haciéndose necesario detener el experimento antes de concluir el ensayo.

Por otra parte, se dificultaba extraer el lingote del canal, debido a que la rebaba se quedaba pegada fuertemente en la matriz. En vista de ello, se decidió mecanizar otros tornillos a los bloques para mejorar el cierre de la matriz, lo cual no dio resultado ya que, durante la puesta a punto y debido a las altas presiones de trabajo, entre 18 y 22 Tn, los dos bloques presentaron formación de grietas (Figura 4.2.), por lo que hubo la necesidad de fabricar una nueva matriz.



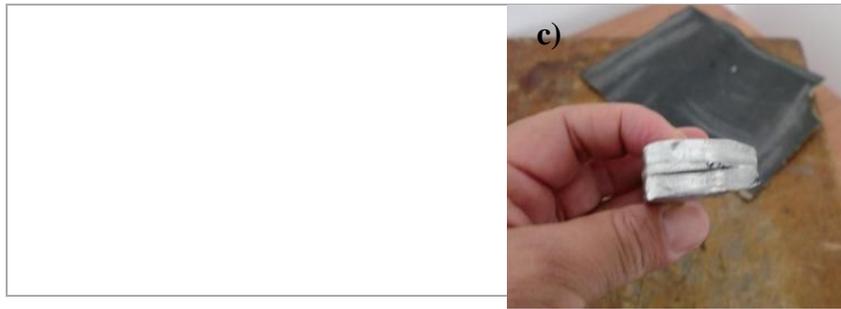


Figura 4.1. Fotografías: a) matriz ECAP evidenciando la separación de los dos bloques durante el proceso de extrusión, b-c) vista frontal e inferior del lingote extruido con formación de rebaba



Figura 4.2. Fotografía mostrando formación de grietas en la matriz ECAP.

Con el fin de examinar por microscopía óptica la microestructura de los lingotes de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La extruidos con formación de rebaba se cortaron y prepararon muestras del Plano Transversal y Longitudinal a la dirección de la extrusión. En la Figura 4.3. se comparan ambas microestructuras observándose en las micrografías correspondientes al Plano Transversal mayor flujo del material hacia la matriz en el borde superior que en el extremo inferior, debido a que los bloques tendían abrirse más en la parte superior como se aprecia en la Figura 4.1. En las micrografías del Plano Longitudinal también se aprecia fuerte distorsión de la microestructura en ambos extremos.

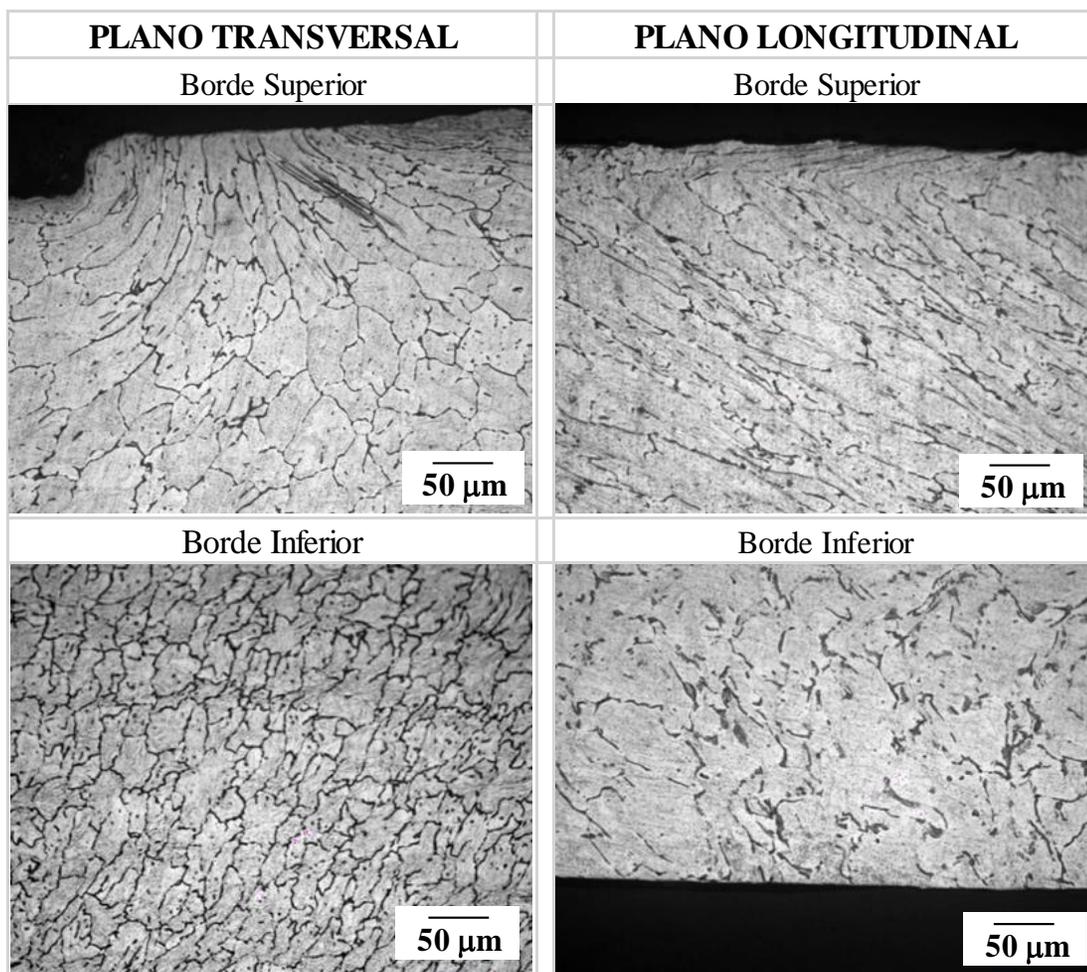


Figura 4.3. Micrografías ópticas mostrando la distorsión de la microestructura del material debido a la abertura de la matriz durante el proceso de extrusión. Magnificación: 50X.

4.1.1. Nueva matriz ECAP

La nueva matriz, el punzón, así como la base y la tapa que se diseñaron y fabricaron adicionalmente para mantener la matriz cerrada durante el proceso de extrusión se presentan en la Figura 4.4. mientras que en la Figura 4.5.(a) se muestra la máquina de ensayo universal, el punzón acoplado en la mordaza superior (Figura 4.5.(b)) y la matriz con la base y la tapa ajustada en la mordaza inferior (Figura 4.5.(c)).

Con estas nuevas piezas (base y tapa) se requiere de mayor tiempo para el ensamblaje de la misma a la máquina de ensayo haciendo el proceso más lento ya que es necesario abrir y cerrar la matriz cada vez que se hace una extrusión. Sin embargo, se logró poner a punto el equipo sin que se separaran los bloques y sin presentar fallas adicionales durante el proceso de extrusión.

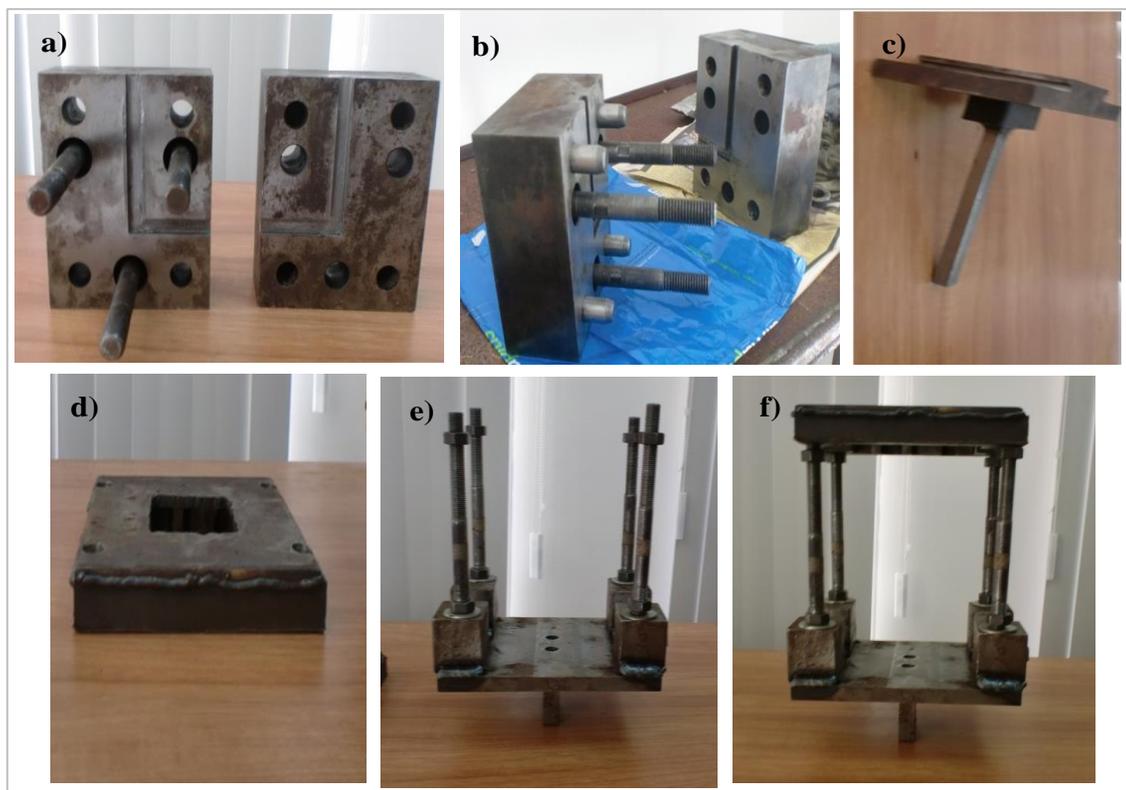


Figura 4.4. Fotografías del nuevo equipo ECAP: a) los dos bloques que constituyen la matriz mostrando el canal en forma de “L”, b) los bloques con los pernos y tornillos, b) punzón, c) tapa, d) base con tornillos, e) base y tapa acopladas

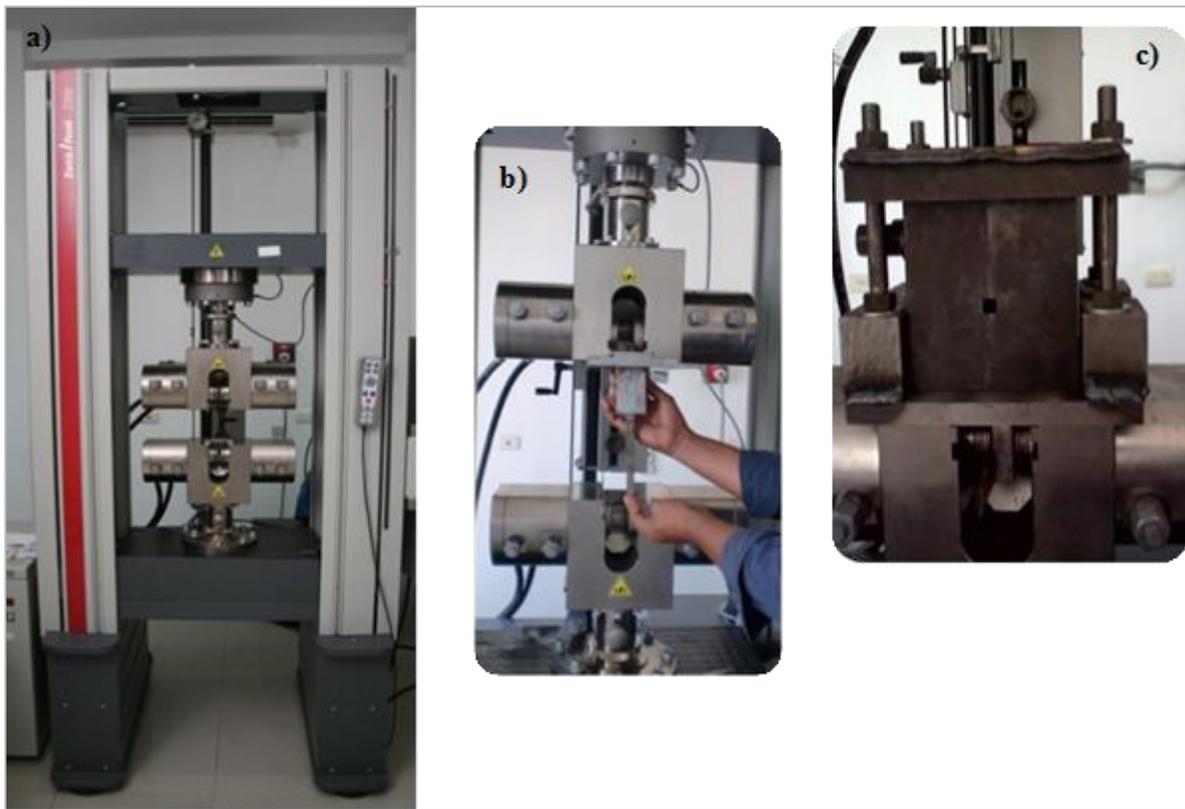


Figura 4.5. Fotografías mostrando la instalación del equipo ECAP a la máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z250

4.2. Procesamiento de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La

Una vez puesto a punto el nuevo equipo ECAP se extruyeron, de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada lingotes con 1, 2, 3 y 4 pases sucesivos sin ningún tipo de defectos, como se aprecia en la Figura 4.6. Todos los ensayos de extrusión se llevaron a cabo a temperatura ambiente con una velocidad del punzón de 1 mm s^{-1} y la ruta de procesamiento B_C como se describe en la sección 3.5.

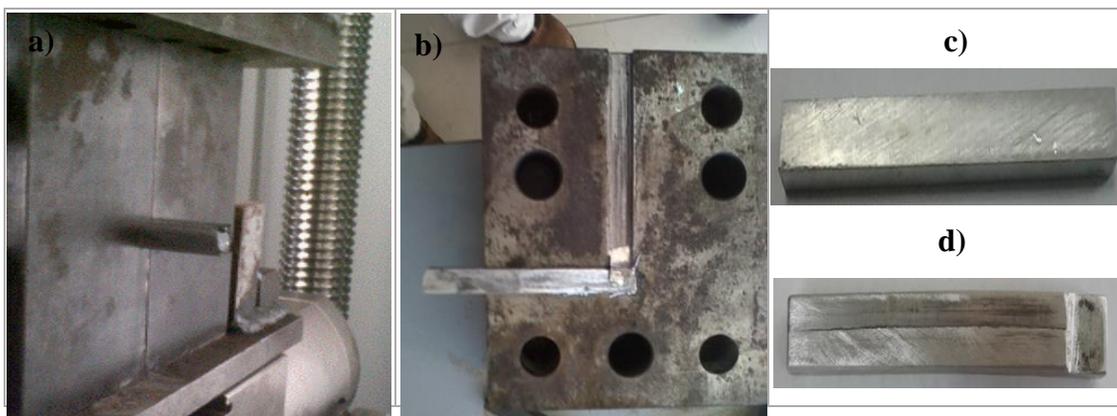


Figura 4.6. Fotografías mostrando: a) lingote extruido saliendo de la matriz ECAP, b) lingote extruido en el canal de salida, c) lingote sin extruir y d) lingote con un pase

Las curvas de la fuerza aplicada (F) versus desplazamiento del punzón registradas durante la extrusión de los lingotes con 1, 2, 3 y 4 pases se presentan en las Figuras 4.7., 4.8., 4.9. y 4.10., respectivamente. En la Tabla 4.1 se listan las coordenadas (Fuerza aplicada, F , posición del punzón, D) de los puntos señalados en cada una de las curvas. Como se aprecia en la Tabla 4.1. la fuerza máxima (Punto 3) requerida para extruir los lingotes, varió entre 126.996,992 N (927,730 MPa) y 184.817,625 N (1353,852 MPa). También se incluye en la Tabla 4.1. la deformación efectiva acumulada en el material (ϵ) por pase en el ECAP, estimada de la ecuación (7) para una matriz con ángulos del canal de $\Phi = 90^\circ$ y $\Psi = 0^\circ$, usada en este estudio.

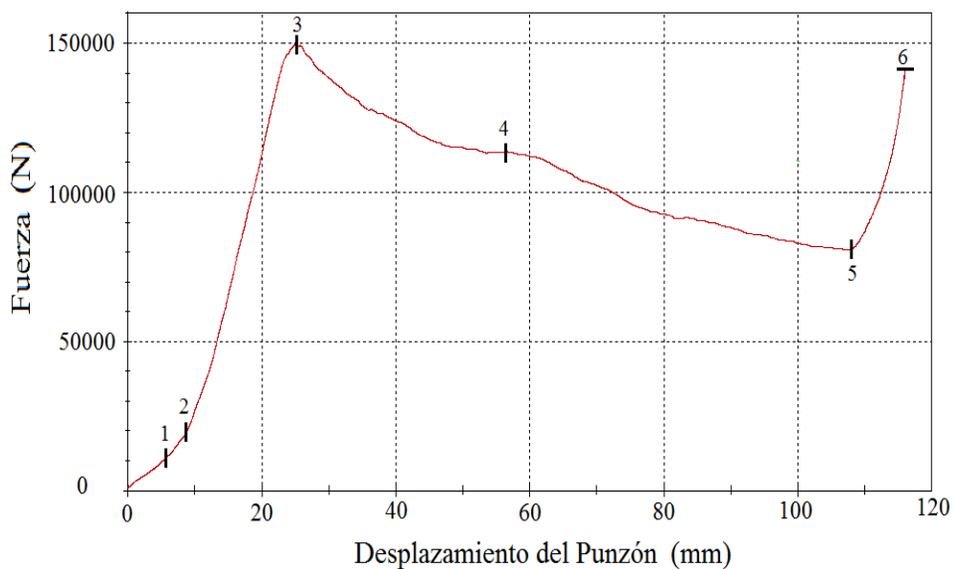


Figura 4.7. Curva de la fuerza aplicada versus desplazamiento del punzón, registrada para el lingote extruido una vez en la matriz ECAP

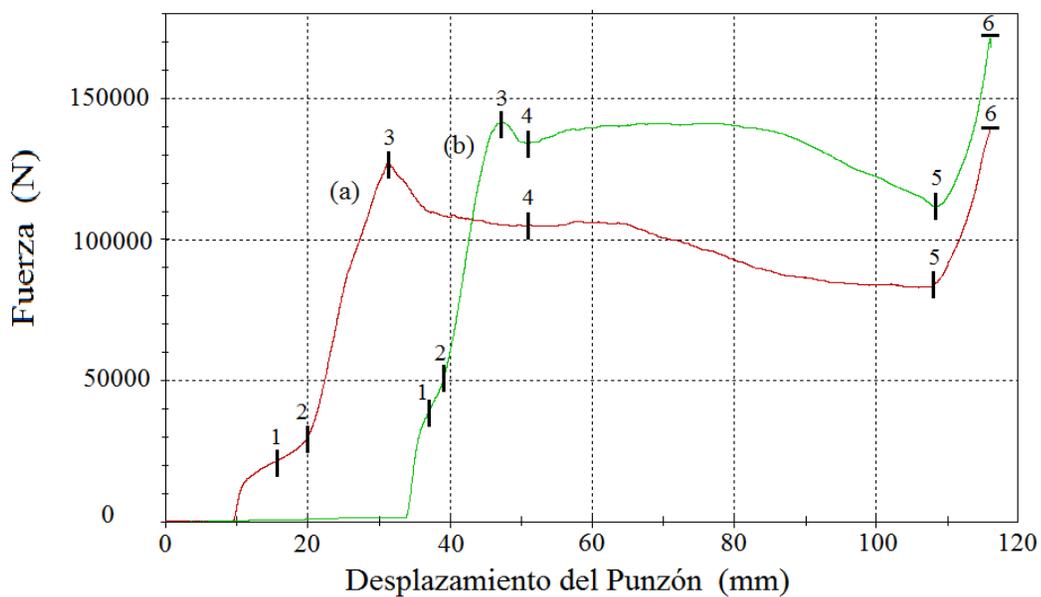


Figura 4.8. Curvas de la fuerza aplicada versus desplazamiento del punzón, registradas para el lingote extruido dos veces consecutivas en la matriz ECAP. (a): primer pase y (b): segundo pase

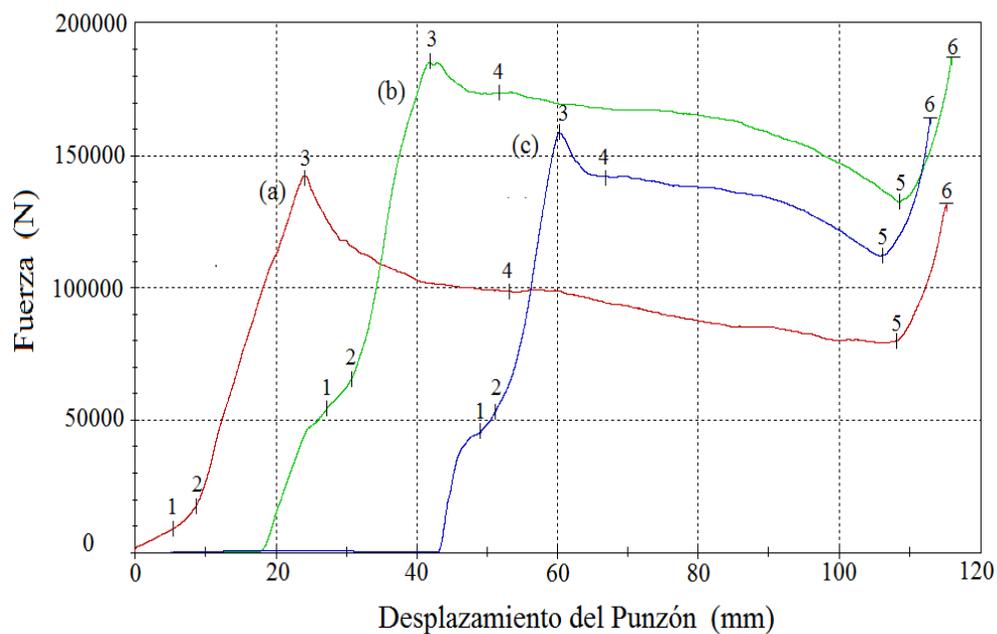


Figura 4.9. Curvas de la fuerza aplicada versus desplazamiento del punzón del lingote extruido tres veces consecutivas en la matriz ECAP. (a): primer pase, (b): segundo pase y (c): tercer pase

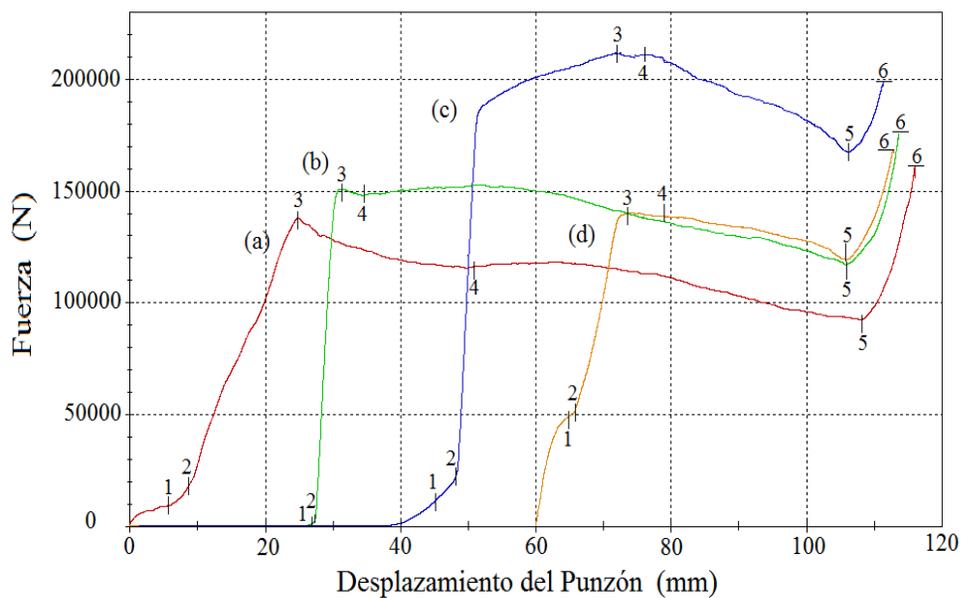


Figura 4.10. Curvas de la fuerza aplicada versus desplazamiento del punzón, registradas para el lingote extruido cuatro veces consecutivas en la matriz ECAP. (a): primer pase, (b): segundo pase, (c): tercer pase y (d): cuarto pase

En las figuras anteriores se aprecia un comportamiento semejante en todas las curvas. Se inicia con un rápido incremento de la fuerza aplicada hasta alcanzar un valor máximo, Punto 3, en el cual la pendiente de la curva cambia y la fuerza disminuye progresivamente hasta llegar al Punto 5 donde de nuevo la fuerza incrementa abruptamente hasta que se detiene el experimento (Punto 6). La fuerza máxima, Punto 3, es considerada como la fuerza necesaria para dar inicio a la deformación luego de superar la fluencia del material, así como las tensiones generadas por acomodación del lingote en el plano de intercepción de los dos canales [64].

Por otra parte, no se observan irregularidades o serraciones a lo largo de las curvas corroborando que en todos los pases a través de la matriz ECAP la aleación fue lo suficientemente dúctil a la temperatura de procesamiento (en este caso a temperatura ambiente), ya que, de lo contrario, se pudieron haber producido defectos localizados en los lingotes durante el proceso de extrusión, como se ha descrito en otros trabajos, como el realizado por Vedani et al. [65] quienes reportan formación de grietas de corte en probetas de la aleación de aluminio AA6082 tratada térmicamente por efectos de fricción entre el lingote y las paredes del canal. También se han reportado grietas de corte en lingotes de aleaciones de aluminio de titanio procesadas dos veces consecutivas por ECAP [66].

Tabla 4.1. Coordenadas de los puntos señalados en cada una de las curvas

Lingote	Pases	Parámetros	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
1	1 ^{er} $\varepsilon=1,15$	F (N)	12.965,001	19.692,703	149.313,563	113.537,039	80.901,984	140.303,266
		D (mm)	6,846	8,736	24,786	54,546	107,996	115,946
2	1 ^{er} $\varepsilon=1,15$	F (N)	21.260,373	28.660,863	126.996,992	104.874,641	83.349,500	139.508,406
		D (mm)	15,466	19,626	31,286	52,096	107,766	115,993
	2 ^{do} $\varepsilon=2,30$	F (N)	42.690,605	48.743,605	141.526,703	134.375,891	111.656,172	170.726.922
		D (mm)	37,736	38,826	47,496	51,456	108,346	115,916
3	1 ^{er} $\varepsilon=1,15$	F (N)	9.214,415	15.326,540	142.381,141	98.558,695	80.220,445	131.411,313
		D (mm)	5,556	8,056	24,036	53,856	108,296	115,286
	2 ^{do} $\varepsilon=2,30$	F (N)	55.645,762	66.698,227	184.817,625	173.501,828	132.460,406	186.304,797
		D (mm)	27,636	30,946	42,806	50,786	108,526	115,916
	3 ^{er} $\varepsilon=3,45$	F (N)	46.098,871	55.134,016	158.611,281	141.852,438	112.580,063	164.291,453
		D (mm)	49,220	51,540	60,340	68,450	106,320	112,960
4	1 ^{er} $\varepsilon=1,15$	F (N)	8.623,040	12.135,600	138.034,391	115.860,430	94.252,164	160.195,656
		D (mm)	4,606	7,206	24,836	50,196	108,906	115,998
	2 ^{do} $\varepsilon=2,30$	F (N)	1.200,463	2.421,338	151.095,516	147.997,516	117.070,484	174.376,344
		D (mm)	27,226	27,636	31,716	34,566	106,706	113,999
	3 ^{er} $\varepsilon=3,45$	F (N)	8.238,33	22.138,188	212.075,984	211.447,594	168.950,703	200.422,688
		D (mm)	43,496	47,816	71,786	75,916	106,576	110,916
	4 ^{to} $\varepsilon=4,60$	F (N)	47.703,941	51.131,691	140.4999,90	138.586,891	119.447,008	168.647
		D (mm)	64,266	65,726	74,056	79,716	108,116	114,016
Parámetros: F: Fuerza Aplicada; D: Posición del punzón en el punto indicado								

4.2.1. Representación esquemática

Con la finalidad de asociar los puntos de inflexión señalados en las curvas con el comportamiento del lingote dentro del canal se realizaron esquemas asociados a cada punto utilizando el diseño básico del canal y la data de las Tablas 4.1 y 4.2. Para este análisis solo se ha considerado presentar a modo de ejemplo los esquemas correspondientes al lingote extruido tres veces consecutivos, los cuales se exhiben en las Figuras 4.11., 4.12. y 4.13.

Los esquemas (a) proporcionan las dimensiones del canal y la longitud inicial del lingote mientras que los esquemas desde la (b) hasta la (f) muestran tanto la posición del punzón (\Downarrow) como la longitud y posición del lingote dentro del canal en los Puntos 1, 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente.

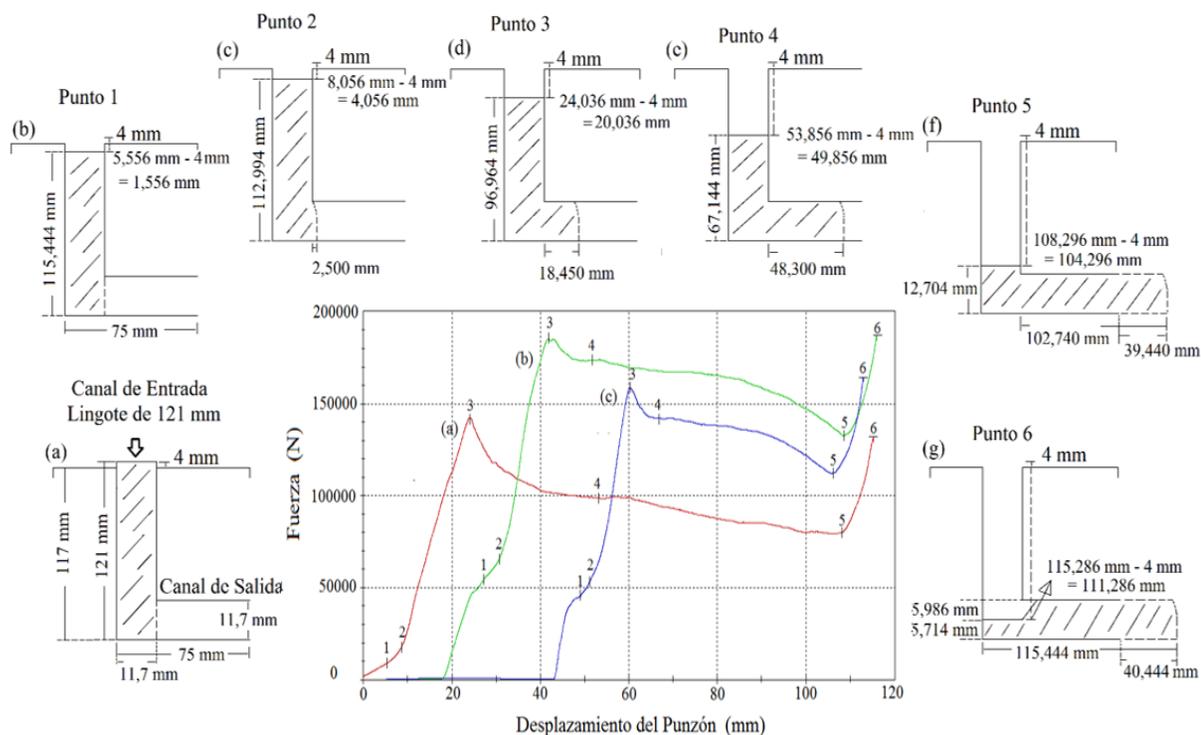


Figura 4.11. Esquemas indicando la posición del punzón (\Downarrow) y del lingote dentro del canal en los puntos señalados en la curva correspondiente al primer pase (curva (a)) del lingote extruido tres veces consecutivas en la matriz ECAP

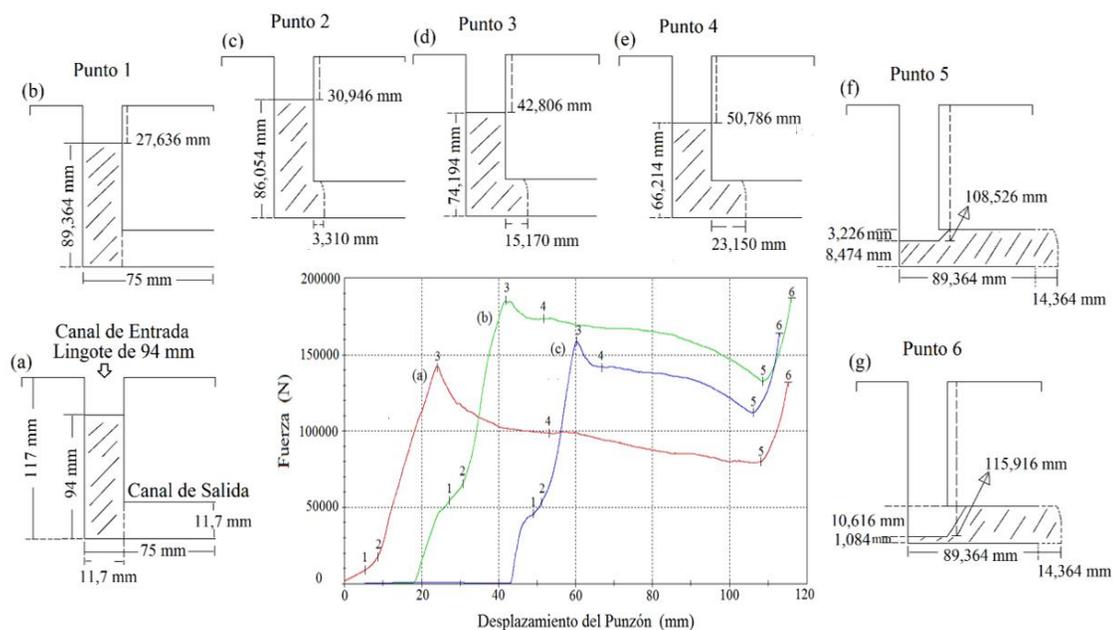


Figura 4.12. Esquemas indicando la posición del punzón (\Downarrow) y del lingote dentro del canal en los puntos señalados en la curva correspondiente al segundo pase (curva (b)) del lingote extruido tres veces consecutivas en la matriz ECAP

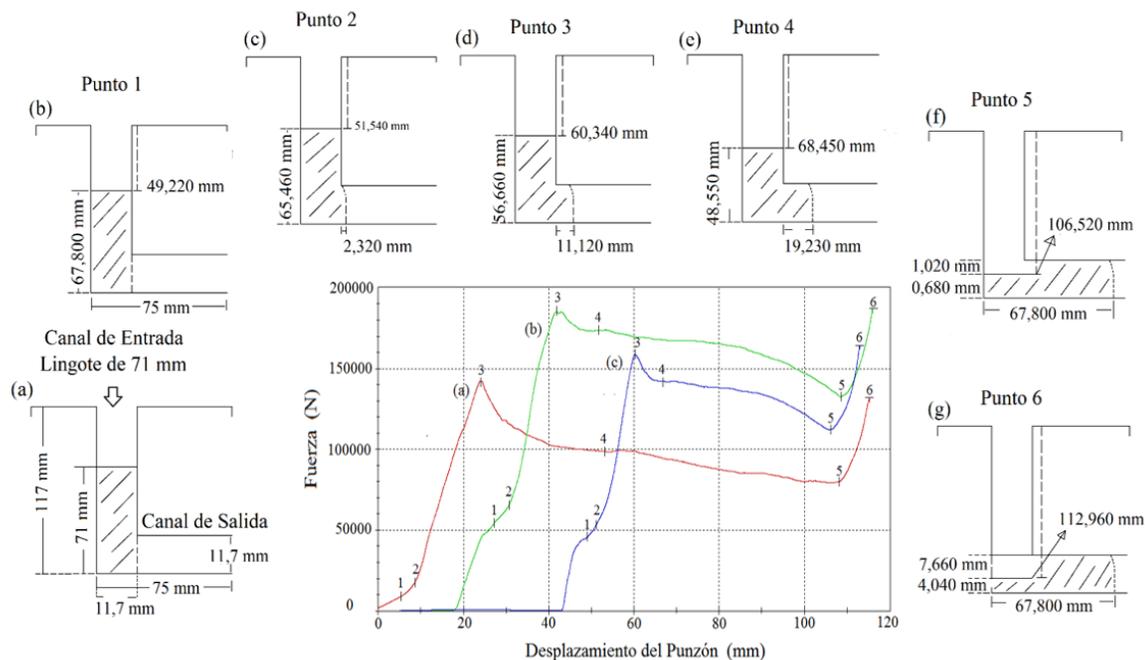


Figura 4.13. Esquemas indicando la posición del punzón (\Downarrow) y del lingote dentro del canal en los puntos señalados en la curva correspondiente al tercer pase (curva (c)) del lingote extruido tres veces consecutivas en la matriz ECAP

Como se señaló en la sección 3.4. en esta investigación se decidió cortar la cuña y la punta del lingote antes de realizar el pase siguiente por el canal. Por lo que, la longitud inicial del lingote para los pases subsiguientes es la longitud final del lingote extruido anteriormente menos lo que mide la cuña y la punta indicado en la Tabla 4.2. Los datos utilizados para realizar los esquemas del lingote extruido tres veces consecutivas se resaltan en las Tablas 4.1. y 4.2, respectivamente.

De acuerdo con los esquemas en el Punto 1 el lingote ha disminuido su longitud y aún permanece en el canal de entrada como se representa en los esquemas (b). Esto debido a que desde el inicio del ensayo la fuerza aplicada incrementa producto del esfuerzo de compresión al que es sometido el lingote, el cual tiende a expandir y a disminuir su longitud.

En el corto recorrido desde el Punto 1 hasta el Punto 2 el lingote ya se acomoda en el plano de intercepción de los dos canales y tiende a fluir hacia el canal de salida (esquemas c). A partir del Punto 2 la fuerza incrementa abruptamente hasta alcanzar un valor máximo, Punto 3, por efecto de la oposición del canal de salida al flujo del material y por la fricción entre la punta del lingote y las paredes del canal. En este Punto 3 el lingote supera el límite elástico y las tensiones generadas por acomodación del lingote en el plano de intercepción de los dos canales y el lingote comienza a fluir al canal de salida como se representa en los esquemas d.

A medida que el lingote avanza a través del plano de corte hacia el canal de salida la carga aplicada comienza a disminuir, pero de manera lenta y progresiva hasta alcanzar el Punto 5, debido a que a medida que avanza la extrusión la fuerza de fricción del canal de entrada y salida no difieren significativamente lo que resulta en una ligera reducción de la fuerza de prensado y el lingote fluye de manera continua y regular hacia el canal de salida.

En el Punto 4 el punzón ha recorrido casi en la mitad del canal de entrada y una mayor porción del lingote ha fluido al canal de salida. En el Punto 5 el punzón se encuentra a unos milímetros por arriba o por debajo de la abertura del canal de salida y prácticamente todo el lingote se ha extruido (esquemas e). En este Punto 5 la fuerza de procesado

incrementa nuevamente hasta que se detiene el experimento (Punto 6). Este nuevo incremento de la fuerza se debe a que el punzón comprime la porción del lingote que se encuentra en el plano de corte, en lugar de hacerlo fluir al canal de salida. Este efecto de compresión forma una especie de cuña en el lingote que abarca inclusive unos milímetros más allá del plano de corte como se aprecia en los esquemas (f y g) y en la Figura 3.6 que se presenta en el apartado 3.4.

Tabla 4.2. Parámetros utilizados en la realización de los esquemas

Lingote	Pases	Li (mm)	Parámetros	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	R (mm)	C (mm)
1	1 ^{er}	122	LLCE (mm)	115,154	113,264	97,214	67,454	14,004	6,054	6,846	20
			LLCS (mm)	-	1,890	17,940	47,700	101,150	115,154		
2	1 ^{er}	107	LLCE (mm)	101,534	97,374	85,714	91,904	9,234	1,007	5,466	20
			LLCS (mm)	-	4,160	15,820	9,63	101,534	101,534		
	2 ^{do}	82	LLCE (mm)	79,264	78,174	69,504	65,544	8,654	1,084	2,736	18
			LLCS (mm)	-	1,090	9,760	13,720	79,264	79,264		
3	1 ^{er}	121	LLCE (mm)	115,444	112,944	96,964	67,144	12,704	5,714	5,556	20
			LLCS (mm)	-	2,500	18,480	48,300	102,740	115,444		
	2 ^{do}	94	LLCE (mm)	89,364	86,054	74,194	66,214	8,474	1,084	4,636	18
			LLCS (mm)	-	3,310	15,170	23,150	89,364	89,364		

	3 ^{er}	71	LLCE (mm)	67,780	65,460	56,660	48,550	10,680	4,040	3,220	18	
			LLCS (mm)	-	2,320	11,120	19,230	67,780	67,780			
4	1 ^{er}	120	LLCE (mm)	115,394	112,794	95,164	69,804	11,094	4,002	4,606	20	
			LLCS (mm)	-	2,600	20,230	45,59	115,394	115,394			
	2 ^{do}	94	LLCE (mm)	89,774	89,364	85,284	82,434	10,294	3,001	4,226	-	
			LLCS (mm)	-	0,410	4,490	7,340	89,774	89,774			
	3 ^{er}	90	LLCE (mm)	73,504	69,184	45,214	41,084	10,424	6,084	16,50	20	
			LLCS (mm)	-	4,320	28,290	32,420	73,504	73,504			
	4 ^{to}	54	LLCE (mm)	52,734	51,274	42,944	37,284	8,884	2,984	1,266	18	
			LLCS (mm)	-	1,460	9,790	15,450	52,734	52,734			
	<p>Li: Longitud inicial del lingote; LLCE: Longitud del Lingote en el Canal de Entrada; LLCS: Longitud del Lingote en el Canal de Salida; R: Reducción; C: Corte de la región del plano de cizalladura y punta.</p>											

Donde:

LLCE, LLCS y R se determinaron de la siguiente manera:

LLCE = Longitud del lingote inicial - Posición del punzón en el Punto que se esté analizado.

LLCS = Longitud del Lingote en el Punto 1 - Longitud del Lingote en el Punto que se esté analizando (D en la Tabla 4.1.).

R = Longitud inicial del lingote (Li) - LLCE en el Punto 1.

A partir de las gráficas, esquemas, tablas y de lo descrito anteriormente resulta claro que en todos los pases por el extrusor el lingote se comporta de manera semejante en el interior del canal independientemente del tamaño de los mismos. Sin embargo, se observó disminución en la carga aplicada a partir del tercer pase, aunque siguen siendo superiores a las cargas requeridas para extruir el lingote por primera vez, confirmando el incremento de la resistencia del material por efecto de la deformación aplicada.

4.3. Caracterización por microscopía óptica de la microestructura de la zona de corte

La microestructura del plano longitudinal (Plano Y en la Figura 3.9) de la zona de intersección de los dos canales de una probeta de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La con un pase por la matriz ECAP evidencia el cambio microestructural que experimenta el material antes, durante y después de pasar por el plano de intersección entre los dos canales, como se aprecia en la Figura 4.14. Para realizar este análisis microestructural, se interrumpió el ensayo de extrusión, se extrajo el lingote de la matriz, se seccionó la zona del plano de intersección de los dos canales y se preparó metalográficamente.

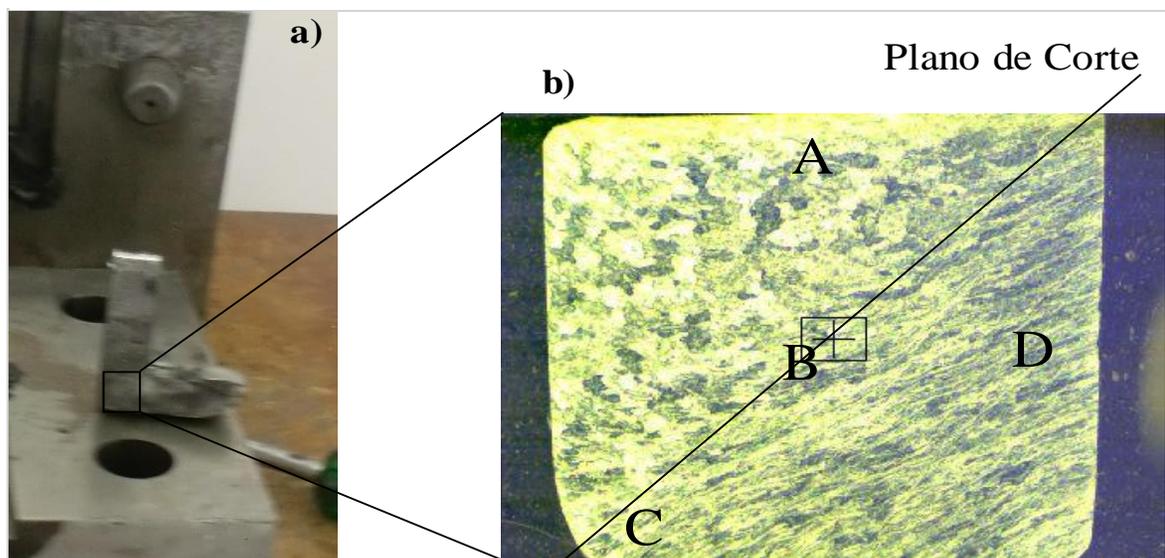


Figura 4.14. a) Ensayo de extrusión interrumpido durante el primer pase de un lingote de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La; b) Microestructura del plano longitudinal de la zona de intersección de los dos canales. Magnificación 10X

El montaje de micrografías ópticas tomadas desde la zona A hasta la B de la región del plano de corte que se presenta en la Figura 4.15 muestra cómo se deforma la estructura de grano de la aleación en estado de colada antes de pasar por el plano de corte. Se observa claramente en el borde superior del montaje una franja de granos alargados seguida de granos menos deformados, lo que nos indica que la deformación del material es provocada desde la parte superior de la probeta hacia el interior de la misma.

Muy cercano al plano de corte la estructura de granos gruesos se distorsiona y ya en el plano de corte (región B) se revela una microestructura severamente deformada y orientada en la dirección del plano de corte aproximadamente a un ángulo de 45° , producto de la deformación por cizalladura simple local y de la configuración del canal en forma de “L”.

En la región C (Figura 4.16) las micrografías del borde lateral del lingote previas al plano de corte muestran una reducción del tamaño grano más significativa y clara que en el centro del mismo debido al efecto de fricción entre las paredes del canal y el lingote. Luego de pasar el plano de corte la estructura de granos deformados es relativamente homogénea debido posiblemente a que cuando el lingote pasa por el plano de intersección de los dos canales el coeficiente de fricción tiende a disminuir minimizando el contacto entre las paredes del canal y el lingote. También se aprecia un llenado casi completo en la esquina inferior del canal, conocida como zona muerta del canal, al momento del giro del lingote por el plano de intersección de los dos canales.

En la región D, correspondiente a la región luego de pasar por el plano de corte, se observa una microestructura de granos alargados orientados aproximadamente 45° en la dirección del plano de corte (Figura 4.17).

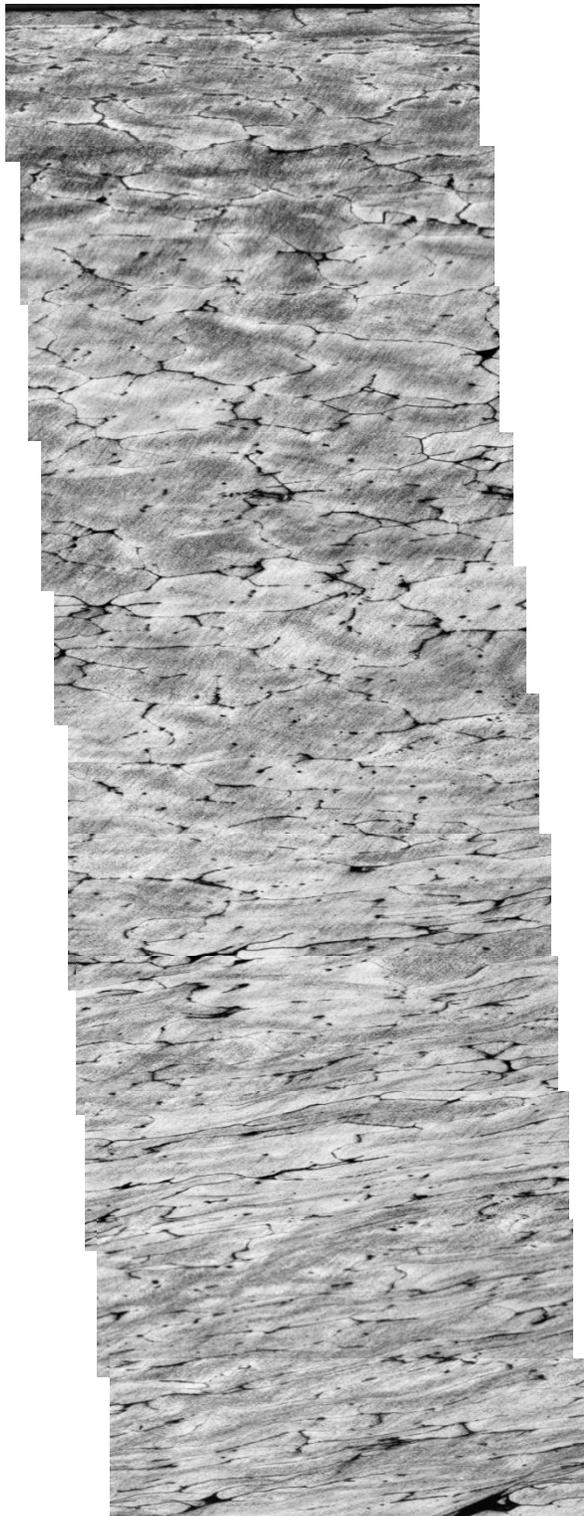


Figura 4.15. Montaje de micrografías ópticas mostrando la evolución de la microestructura desde la región A hasta la región B correspondiente a la parte central de la zona de intersección de los dos canales.

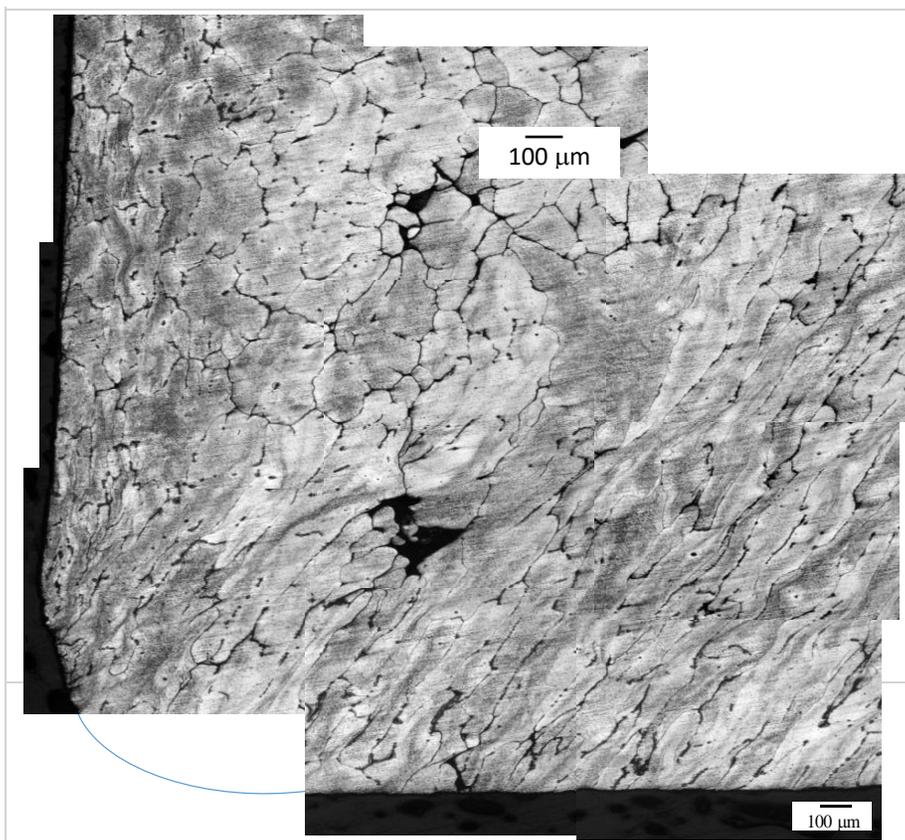


Figura 4 16. Montaje de micrografías ópticas mostrando la estructura granular en la esquina inferior del plano de intersección de los dos canales (región C)

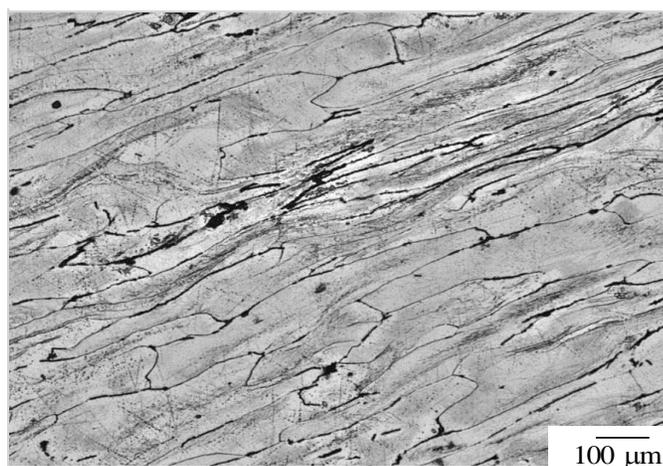


Figura 4.17. Micrografía óptica mostrando la estructura de grano luego de pasar por plano de intersección de los dos canales (región D)

4.4. Estructura de grano

En la Figura 4.18. se presenta la microestructura típica de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada, la cual consiste de un arreglo de granos gruesos relativamente equiaxiales con un tamaño promedio de grano de $213,6 \mu\text{m}$ y aspecto de radio de 1,96.

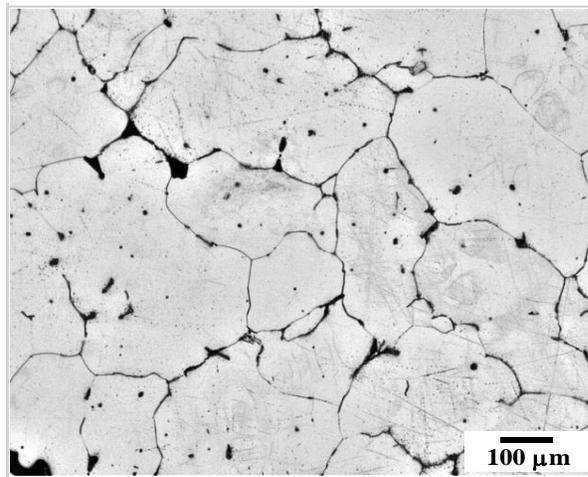


Figura 4.18. Micrografía óptica mostrando la estructura de grano de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada

La estructura de grano, en el sentido de la dirección de la extrusión (Plano Z, Figura 3.9), de los lingotes de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La extruidos con 1, 2, 3 y 4 pases consecutivos en la matriz ECAP se presenta en las micrografías de la Figura 4.19, en las que se observa un reordenamiento de las fronteras de granos luego del proceso de extrusión. Con el primer pase por el ECAP, para una deformación equivalente de $\epsilon=1,15$, el promedio del tamaño de grano de la aleación se redujo apreciablemente de $213,6 \mu\text{m}$ a $151,0 \mu\text{m}$; la microestructura es una mezcla de granos equiaxiales y granos levemente alargados con un promedio de aspecto de radio de 2,74.

Con dos pases consecutivos por la matriz ECAP, correspondiente a una deformación equivalente de $\epsilon = 2,31$, se destaca una microestructura de granos alargados de aristas relativamente rectas, los cuales se orientan levemente hacia la dirección del plano de corte.

Este incremento en la deformación produjo una disminución del tamaño del grano (127 μm) y un aumento significativo en su aspecto de radio a 5,19.

Con tres pases consecutivos, para una deformación equivalente de $\varepsilon = 3,46$ se aprecia una estructura deformada orientada en la dirección del plano de corte en un ángulo de 45° . Se observan granos con forma irregular de menor tamaño (106,8 μm) y de aspecto de radio (4,16).

En el lingote extruido cuatro veces consecutivas en la matriz ECAP ($\varepsilon = 4,62$) la estructura de grano se distorsiona fuertemente; los granos dejan de estar totalmente alineados y es difícil diferenciar claramente las formas de los granos individuales. Sin embargo, se logró identificar y medir algunos granos obteniéndose un promedio de tamaño de grano de 75,5 μm , lo que representa una disminución de un 64,7% con respecto al grano inicial. El aspecto de radio fue de 2,71 semejante a la del primer pase (2,74) sugiriendo que la estructura de grano tiende a asumir formas más equiaxiales a medida que aumenta la deformación en concordancia con las predicciones teóricas en cuanto al restablecimiento de una estructura de granos refinados equiaxiales cada cuatro pases usando la ruta B_C [67-68].

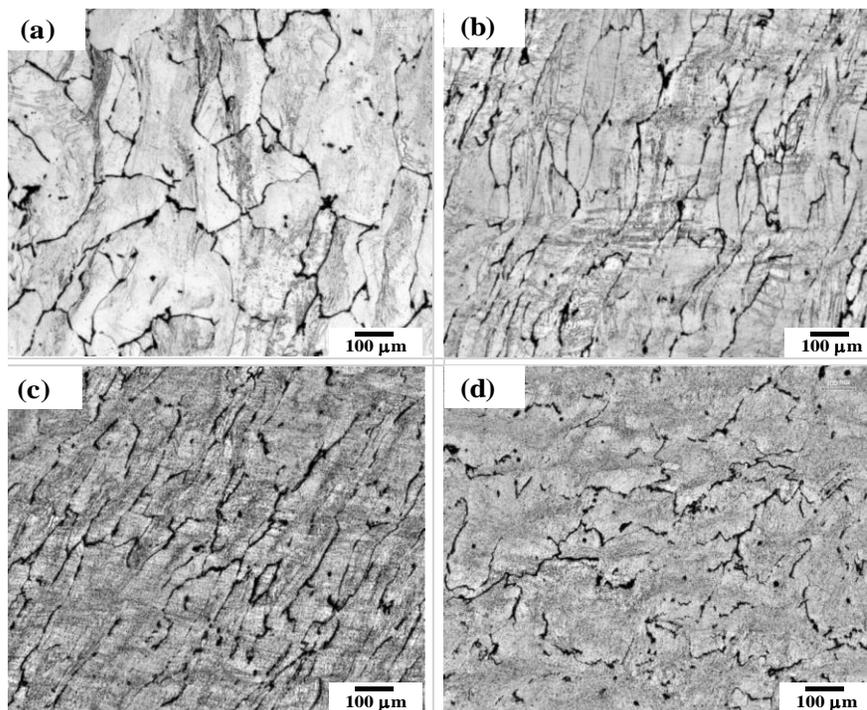


Figura 4.19. Micrografías ópticas mostrando la microestructura de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La obtenida con: a) un pase, b) dos, c) tres y d) cuatro pases consecutivos por la matriz ECAP.

Finalmente, se presenta en la Figura 4.20. una gráfica del promedio del tamaño de grano y del aspecto de radio en función de la deformación aplicadas (número de pases), a fin de presentar en términos porcentuales la evolución de ambos parámetros a medida que se incrementa la deformación. Con el primer pase se produjo una disminución del promedio del tamaño de grano de un 29% con respecto al grano inicial y su aspecto de radio incrementó aproximadamente el mismo porcentaje (30%). En cuanto a la estructura obtenida con dos pases consecutivos el tamaño de grano disminuyó un 15% con respecto al primer pase, sin embargo, su aspecto de radio incrementó casi el triple (54%) debido a la forma elongada de los granos.

Luego de tres pases sucesivos en la matriz ECAP la estructura de grano se deformó apreciablemente, sin embargo, el tamaño de grano continuó disminuyendo, presentado en este caso un porcentaje de reducción de un 15%, semejante al que se observó en el pase

anterior, mientras que el aspecto de radio de los granos, presentó una disminución de un 30% con relación al segundo pase. Con cuarto pase consecutivo el tamaño de grano disminuyó un 29% y el aspecto de radio se redujo un 35% con relación al tercer pase, siendo estos porcentajes semejantes a los presentados en el primer pase respecto al grano inicial, sugiriendo como se mencionó anteriormente el restablecimiento de una estructura de granos equiaxiales con cuatro pases sucesivos por la matriz ECAP.

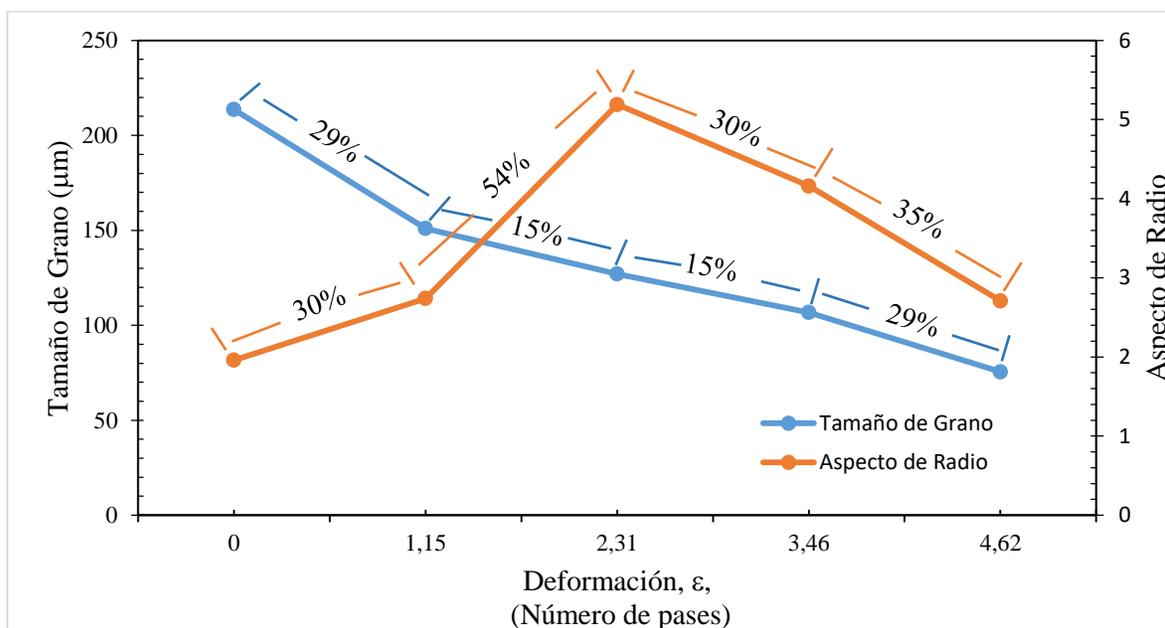


Figura 4. 20. Variación del promedio del tamaño de grano y del aspecto de radio con respecto al número de pases en el ECAP de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La.

4.5. Microdureza Vickers

La Figura 4.21. exhibe los valores promedio de microdureza Vickers graficados en función de la deformación equivalente (número de pases). Como se aprecia en la Figura se parte de una dureza de 65,6 HV alcanzándose con el último cuarto pase un máximo de 117 HV producto del endurecimiento por deformación adquirido durante el proceso de extrusión. Esta variación en la dureza representa un incremento de 43,9% con respecto al valor

inicial, evidenciando que se producen mejoras notables en la dureza de la aleación por efecto de la deformación por ECAP.

El mayor incremento se da en los dos primeros pases, aumentando un factor de aproximadamente 1,7 veces con respecto a la dureza del material de partida. A partir de allí, el aumento de la dureza no es tan pronunciado observándose un efecto de saturación. Variaciones semejante de la microdureza se ha observado en aleaciones de aluminio como en la aleación AA6063T6 (Al-Mg-Si) procesada hasta ocho pases mediante las rutas C y E a temperatura ambiente [69].

Este comportamiento sugiere que el desarrollo microestructural que determina la dureza del material durante el proceso ECAP es más pronunciado con uno y dos pases, haciendo el proceso por ECAP una forma eficiente y rápida de mejorar las propiedades mecánicas de los materiales.

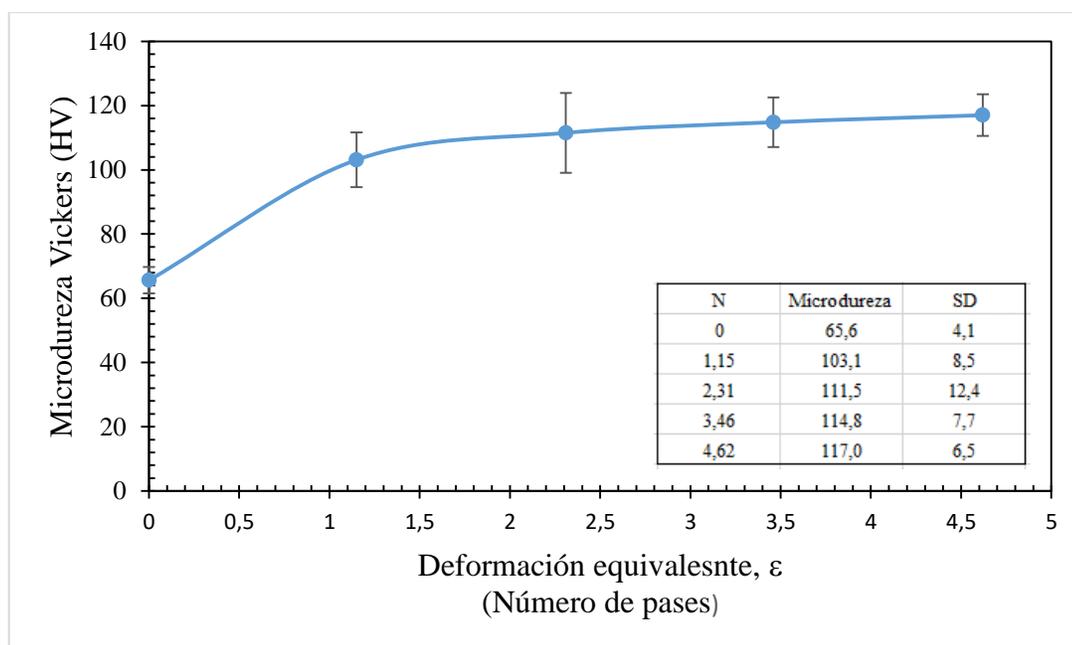


Figura 4.21. Evolución de la microdureza Vickers de la aleación Al-Mg-Si-0,14%La durante el proceso ECAP

4.6. Consideraciones generales sobre el incremento de la dureza durante la deformación ECAP

A nivel subestructural en las etapas iniciales de la deformación las dislocaciones existentes en la red cristalina del material comienzan a desplazarse, las cuales, al encontrarse con obstáculos, como precipitados, se dividen incrementándose de esta manera el número de dislocaciones presentes en el material. Esto produce la fragmentación del grano debido a la formación de estructuras de dislocaciones de baja energía las cuales se ordenan dentro del grano formando una estructura celular o subgranos de menor tamaño delimitados por límites de ángulo bajo [70-71]. Por esta razón se produce con el primer pase una alta fracción de límites de grano de ángulo bajo permitiendo que los granos del material puedan ser significativamente refinados. Esta estructura de bloques de celdas o subgranos está asociada con distorsiones de la red cristalina, lo que provoca el aumento significativo de la microdureza en el material. [72].

Con el incremento de la deformación la tasa de generación de dislocaciones se reduce debido a un proceso de generación y aniquilación de las mismas, es decir la mayoría de las dislocaciones se acumulan en los límites de grano y son efectivamente absorbidas en ellos. Esta reorganización de las dislocaciones internas en los límites de la dislocación promueve que estos límites se transformen progresivamente en límites de ángulo alto, los cuales son los responsables de la estructura de grano ultrafino producida a altas deformaciones [4,51,73].

A pesar de que las dislocaciones de la red son absorbidas en parte por los nuevos límites de grano la microdureza del material aumenta, llegándose a alcanzar un valor de saturación en el cual la densidad de dislocaciones se mantiene relativamente constante. De manera que la mayor contribución a la resistencia del material proviene de los límites de grano de ángulo bajo, pero a medida que se incrementa la deformación en el material (número de pases) toma mayor importancia el continuo incremento en la fracción de los límites de ángulo alto.

Capítulo V

CONCLUSIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

1. Basados en el diseño propuesto y desarrollado por Wladimir Segal de una matriz para generar deformación por cizallamiento simple en metales y aleaciones sin cambio aparente en el área transversal de la pieza se fabricó una matriz con una configuración del canal de $\Phi = 90^\circ$ y $\Psi = 0^\circ$, se instaló en la máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z250 y se puso en funcionamiento.
2. Con las condiciones experimentales impuestas se logró extruir probetas de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada hasta cuatro pases consecutivos sin presentar defectos o fallas en la superficie de las mismas.
3. Las curvas de la fuerza aplicada en función del desplazamiento del punzón registradas en cada pase por la matriz ECAP evidencian un flujo regular de las probetas a través de la matriz.
4. El proceso de deformación plástica severa por ECAP produjo un refinamiento notable en el tamaño de grano de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada, obteniéndose con cuatro pases sucesivos por la matriz una reducción del tamaño de grano de un 64,7% con respecto al tamaño de grano inicial debido a la alta deformación efectiva acumulada en el material cada vez que pasa por la matriz.
5. Los resultados de microdureza Vickers mostraron una mejora del 36,4% de la dureza de la aleación durante los dos primeros pases por ECAP, exhibiendo a partir de allí una tendencia hacia la saturación con valores próximos a 117 HV, lo que corresponde a un incremento porcentual del 43,9% respecto a la dureza de la aleación en estado de colada.
6. La buena extrusión a temperatura ambiente y el refinamiento microestructural obtenido en la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada hace que

la deformación ECAP pueda tener una buena aceptación a nivel industrial para satisfacer demandas personalizadas de producción de materiales de grano ultrafinos y con mejores propiedades mecánicas.

REFERENCIAS

1. Guerrero V. H., Dávila J. L., Galeas S., Pontón P., Rosas N. M., Sotomayor V., Valdivieso C. (2011). *Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales*. Primera edición. Quito-Ecuador.
2. Olejnik L., Rosochowski A., (2005). Methods of fabricating metals for nanotechnology. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 53(4): 413-423.
3. Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T. G., (2001). Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*. 36(12): 2835-2843.
4. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V., (2000). Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*. 45(2): 103-189.
5. Thangapandian N., Balasivanandha Prabu S., (2015). The Role of Corrugation Die Parameters on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy (AA 5083) Processed by Repetitive Corrugation and Straightening. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 3, 208-212.
6. Rodríguez R., Benito J. A., Cabrera J.M., (2007). Procesos de severa deformación plástica para obtener materiales de grano nanométricos y ultrafinos. *Revista Ingeniería e Investigación*. 27 (1): 101-105.
7. Cabrera J.M., Rodríguez R., (2008). Obtención de materiales metálicos de tamaño de grano ultrafino. *Scientia et Technica*. Año XIV (38): 165-169.
8. Segal V. M., (1995). Materials processing by simple shear. *Materials Science and Engineering A*. 197(2):157-164.
9. Fang D.R., Zhang Z.F., Wu S.D., Huang C.X., Zhang H., Zhao N.Q., Li J.J., (2006). Effect of equal channel angular pressing on tensile properties and fracture modes of casting Al–Cu alloys. *Materials Science and Engineering A*. 426 (1-2): 305-313
10. Zhilyaev A.P., Kim B.K., Szpunar J.A., Baró M.D., Langdon T.G., (2005). The microstructural characteristics of ultrafine-grained nickel. *Materials Science and Engineering: A*, 391 (1-2): 377-389.
11. Sastry S.M.L., Mahapatra R.N. (2001). Grain refinement of intermetallics by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering A*. 329:872-877.
12. Valiev R. Z., Ivanisenko Y.V., Rauch E. F., Baudelet B. (1996). Structure and deformation behaviour of armco iron subjected to severe plastic deformation. *Acta Materialia*. 44(12): 4705-4712.

13. Langdon T. G, Furukawa M, Nemoto M, Horita Z., (2000). Using equal channel angular pressing for refining grain size. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 52(4): 30-33.
14. Kim K.J., Yang D.Y., Yoon J.W., (2010). Microstructural evolution and its effect on mechanical properties of commercially pure aluminum deformed by ECAE (Equal Channel Angular Extrusion) via routes A and C. *Materials Science and Engineering A*. 527 (20-30) 7927-7930.
15. Jin L., Lin D., Zeng X., Mao D., Ding W., (2007). Effect of second phase particles on grain refinement of Mg-Al-Zn alloy during ECAE. *Materials Science Forum*. 546-549:315-318.
16. Zhao Y.H., Liao X.Z., Jin Z., Valiev R.Z., Zhu Y.T., (2004). Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing. *Acta Materialia*. 52 (15): 4589-4599.
17. Adamczyk-Cieślak B., Mizera J., Kurzydłowski K. J. (2011). Microstructures in the 6060 aluminium alloy after various severe plastic deformation treatments. *Materials Characterization*. 62 (3): 327-332.
18. Kim W.J., Wang J.Y. (2007). Microstructure of the post-ECAP aging processed 6061 Al alloys. *Materials Science and Engineering A*. 464 (1-2): 23-27
19. Gleiter H., (1989). Nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*. 33(4):223-315.
20. Suryanarayana C., (1995). Nanocrystalline materials. *International Materials Reviews*. 40(2):41-64.
21. De Garmo E.P., Black J. T., Kohser R. A. (1994). *Materiales y procesos de fabricación*, Vol. 1. Barcelona. Editorial Reverté, S.A. Segunda Edición.
22. Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., (2002). The use of severe plastic deformation for microstructural control. *Materials Science and Engineering A*. 324:182-89.
23. Valiev R.Z., Estrin Y., Langdon T.G., Zehetbauer M. J., Zhu Y.T., (2006). Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 58(4):33-39.
24. Gleite R H., (2000). Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*. 48(1):1-29.
25. Segal V. M., (2020). Equal-channel angular extrusion (ECAE): From a laboratory curiosity to an industrial technology. *Metals*. 10(2): 1-15.

26. Gazder A.A., Dalla Torre F., Gu C.F., Davies C.H.J., Pereloma E.V., (2006). Microstructure and texture evolution of bcc and fcc metals subjected to equal channel angular extrusión. *Materials Science and Engineering A*. 415(1-2):126–139.
27. Segal V.M., Goforth R.E., Hartwig T.K., (1995). Apparatus and method for deformation processing of metals, ceramics, plastics and other materials. Patent US5400633.
28. Pérez I., LuisPérez C., Luri R., León J., Puertas I., (2011). Análisis de la influencia del tratamiento térmico de envejecimiento en la modificación de las propiedades mecánicas de la aleación AA6060 procesada por ECAE. *Revista de Metalurgia*. 47(1): 76-89.
29. Iwahashi Y., WangJ., HoritaZ., Nemoto M., Langdon T.G., (1996). Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. *Scripta Materialia*. 35(2):143-146.
30. William S., (2006). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de materiales*, México D.F. McGraw-Hill. Cuarta Edición.
31. Dieter G., (1976). *Mechanical Metallurgy*, USA.Mc-Graw-Hill.Second Edition.
32. Langdon T. G, Furukawa M, Nemoto M, Horita Z., (2000). Using equal-channel angular pressing for refining grain size. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 52(4): 30-33.
33. Valiev R. Z., Langdon T. G., (2006). Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*. 51(7); 881-981
34. Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T. G., (2001). Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*. 36(12): 2835-2843.
35. Segal V.M., (2004). Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE). *Materials Science and Engineering A*. 386(1-2):269–276
36. Segal V.M., (2003). Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusión. *Materials Science and Engineering A*. 345(1-2):36-46.
37. Vedani M., Bassani P., Tuissi A., Angella G., (2004). Ultrafine grained alloys produced by severe plastic deformation: issues on microstructural control and mechanical behaviour. *Metallurgical Science and Technology*. 33(2):21-30.
38. Mendes A, Prados E. F, Valio G. T, Rubert J. B, Sordi V. L, Ferrante M.(2011). Severe plastic deformation by equal channel angular pressing: product quality and operational details. *Materials Research*. 14(3):335-339.

39. Srinivasan R., (2001). Computer simulation of the equal channel angular extrusion (ECAE) process. *Scripta Materialia*. 44(1): 91-96.
40. González P.A., Luis-Pérez C., Garcés Y., Gil-Sevillano J., (2001). ECAE, una tecnología de procesamiento emergente para producir propiedades relevantes en materiales metálicos. *Revista de Metalurgia (Madrid)*, 37:673-692.
41. Segal V.M., (2004). Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE). *Materials Science and Engineering A*. 386(1-2):269–276.
42. Novara I., Severino M., Fernández Bugna J., Turner P., Signorelli J., (2005). Modelización del proceso de extrusión angular. Parte I: Análisis por elementos finitos del flujo de material. *Mecánica Computacional*. XXIV, 3205-3215.
43. Flórez L.C., Mesa C.A., Higuera O.F. González H.A., (2017). Efecto de la fricción y la geometría de la matriz sobre la distribución de la deformación durante el proceso de presión en canal angular de sección constante. Conference: IX Congreso Internacional de Materiales.CIM 2017-Medellin, Colombia. pp. 1-8.
44. Segal V.M., (1999). Equal channel angular extrusion: from macromechanics to structure formation. *Materials Science and Engineering A*. 271(1-2):322-333.
45. Cornwell L. R., Hartwing K. T., Goforth R. E., Semiatin S. L., (1996). The equal channel angular extrusion process for materials processing. *Materials Characterization*. 37(5): 295-300.
46. Berbon P.B., Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., (1999). Influence of Pressing Speed on Microstructural Development in Equal-Channel Angular Pressing. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 30(8):1989-1997.
47. Caballé Rodríguez, I., (2005). *Diseño y puesta a punto de un sistema de conformación por extrusión en canal angular para obtención de materiales metálicos con grano ultrafino*. Trabajo final de carrera. Universidad de Catalunya. Barcelona, España.
48. Valiev R.Z., Murashkin M.Y., Semenova I.P., (2010). Grain boundaries and mechanical properties of ultrafine-grained metals. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 41(4): 816-822.
49. Valiev R. Z., Krasiinikov N. A., TsenevN. K., (1991). Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure. *Materials Science and Engineering A*. 137:35-40.
50. Valiev R. Z., Korznikov A. V., Mulyukov R. R., (1993). Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering A*. 168(2):141-148.

51. Valiev R.Z., (2004). Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties. *Nature Materials* 3:511-516.
52. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C., (2002). Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation. *Journal of Materials Research*. 17(1):5-8.
53. Valiev R.Z., Salimonenko D.A., Tsenev N.K., Berbon P.B., Langdon T.G., (1997). Observations of high strain rate superplasticity in commercial aluminum alloys with ultrafine grain sizes. *Scripta Materialia*. 37(12):1945-1950.
54. Xu C., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G., (2003). Using ECAP to achieve grain refinement, precipitate fragmentation and high strain rate superplasticity in a spray-cast aluminum alloy. *Acta Materialia*. 51(20):6139-6149.
55. Xu Ch., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G., (2004). Producing superplastic ultrafine-grained aluminum alloys through severe plastic deformation. *Materials Science Forum*. (447-448):403-410.
56. Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D.Y., Micari F., Lahoti G.D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A., (2008). Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 57:716-735.
57. Zhu Y.T., Langdon T.G., (2004). The fundamentals of nanostructured materials processed by severe plastic deformation. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society* (TMS). 56(10):58-63.
58. Yanagida A., Joko K., Azushima A., (2008). Formability of steels subjected to cold ECAE process. *Journal of Materials Processing Technology*. 201(1-3): 390-394.
59. Stolyarov V.V., Zhu Y.T., Alexandrov I.V., Lowe T.C., Valiev R.Z., (2001). Influence of ECAP routes on the microstructure and properties of pure Ti. *Materials Science and Engineering A*, 299(1-2):59-67.
60. Norma ASTM E3-01, (2001). Standard guide for preparation of metallographic specimens, American Society of Testing and Materials, ASTM International, PA. USA.
61. VanderVoort].
62. VanderVoort G.F., (2004). Metallographic techniques for aluminum and its alloys. In *Metallography and Microstructures*, vol. 9, VanderVoort, G.F. (Ed.), pp. 711-751. Materials Park, OH: ASM International.

63. Norma ASTM E112-96, (1996). “Standard Test Method for Determining Average Grain Size”, American Society of Testing and Materials, ASTM International, PA. USA.
64. Norma ASTM E384-17, (2017). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, American Society of Testing and Materials, ASTM International, PA. USA.
65. Shan A., Moon I.G., Park J.W., (2002). Estimation of friction during equal channel angular (ECA) pressing of aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 122: 255-259.
66. Vedani M., Bassani P., Cabibbo M., Latini V., Evangelista E., (2003). Experimental aspects related to equal channel angular pressing of a comercial AA6082 alloy. *Metallurgical Science and Technology*, 21(2): 1-8.
67. Langdon T. G, Furukawa M, Nemoto M, Horita Z., (2000). Using equal channel angular pressing for refining grain size. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 52(4): 30-33.
68. Berta M. Apps P.J., Prangnell P.B., (2005). Effect of processing route and second phase particles on grain refinement during equal-channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering A*. 410-411:381-385.
69. Qian T., Marx M., Schüler K., Hockauf M., Vehoff H., (2010). Plastic deformation mechanism of ultra-fine-grained AA6063 processed by equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*. 58: 2112–2123.
70. Erinosh M. F., Akinlabi E. T., (2016). A Review: Plastic deformation through equal channel angular pressing. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. Vol. II:1-5.
71. Langdon T.G. (2007). The processing of ultrafine-grained materials through the application of severe plastic deformation. *Journal of Materials Science*. 42(10):3388-3397.
72. Sitdikov O.Sh., Kaybyshev R.O., Safarov I.M., mazurina I.A., (2001). Evolution of the microstructure and mechanisms of formation of new grains upon severe plastic deformation of the 2219 aluminum alloy. *The physic of Metals and Metallography*. 92(3):270-280.
73. Qiao X.G., Gao N., Starink M.J., (2012). A model of grain refinement and strengthening of Al alloys due to cold severe plastic deformation. *Philosophical Magazine*. 92(4): 446-470.

HOJAS DE METADATOS

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 1/6

Título	Fabricación de un equipo de extrusión para el refinamiento de grano: Aplicación a la aleación Al-Mg-Si-La
Subtítulo	

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código ORCID / e-mail	
Paredes Dugarte Solange Ysbeth	ORCID	0000-0002-8873-1152
	e-mail	padu99@yahoo.com
	e-mail	
	ORCID	
	e-mail	
	e-mail	

Palabras o frases claves:

deformación plástica severa (SPD)
presión en canal angular de sección constante (ECAP)
refinamiento de grano,
aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 2/6

Área o Línea de investigación:

Área	Subáreas
Ingeniería y Tecnología, Ciencias de los Materiales	Caracterización de materiales por técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido microscopía electrónica de transmisión y difracción de rayos-X
Línea de Investigación: Optimización y caracterización nanoestructural de aleaciones ligeras	

Resumen (abstract):

Resumen

Las nuevas tecnologías han demostrado el impacto que tiene el tamaño del grano en las propiedades de los materiales metálicos, de tal forma que su refinamiento a escala nanométrica se ha convertido en un reto para los investigadores e ingenieros de la ciencia de materiales. En la práctica el prensado por presión en canal angular de sección constante, ECAP (del acrónimo en inglés Equal Channel Angular Pressing) es uno de los métodos con mayor potencial para procesar materiales policristalinos con tamaño de grano ultrafino. Esta técnica consiste en presionar una muestra a través de una matriz especial que contiene dos canales de igual sección transversal que se interceptan un ángulo Φ . El material al ser forzado a pasar a través de la intersección de los canales se deforma fuertemente por cizalladura simple y de esta manera se consigue afinar el tamaño de grano.

En este sentido el propósito de este trabajo consistió en fabricar y poner a punto un equipo de extrusión por ECAP con el fin de procesar la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La y evaluar su respuesta frente a la deformación aplicada, específicamente en dos aspectos: refinamiento de grano y propiedades mecánicas (microdureza). La aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La se obtuvo adicionando 0,14% La a una aleación comercial de aluminio AA6063 destinada para extrusión como posible vía para reducir el efecto nocivo de las partículas intermetálicas ricas en hierro en la extrudabilidad de la aleación.

El diseño del equipo ECAP, el cual consta de un punzón y una matriz, se hizo en base a la configuración y dimensiones de las mordazas de la máquina de ensayo universal Zwick/Roell Z250, utilizada para acoplar el dispositivo y llevar a cabo los ensayos de extrusión. Para fabricar el punzón y los dos bloques que constituyen la matriz se seleccionó el acero AISI 4140 (Cr-Mo). En cada uno de los bloques se mecanizaron dos canales rectangulares de 6 mm^2 de sección transversal y se interceptaron un ángulo $\Phi = 90^\circ$ en forma de "L". Adicionalmente, se diseñó y fabricó, en acero al carbono ASTM A38, una base y una tapa para encofrar la matriz y evitar que los bloques se separaran durante el proceso de extrusión. Para la puesta a punto del equipo, del tocho de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada, se cortaron y mecanizaron probetas rectangulares de $11,7 \text{ mm}^2$ de sección transversal y de 117 mm de longitud, luego se lubricaron con bisulfuro de molibdeno y se fueron procesaron en la matriz ECAP hasta lograr obtener una aplicación con los parámetros adecuados para extruir las probetas sin ningún tipo de falla. La aplicación se creó en modo compresión con el programa TestXpert II que controla la máquina de

ensayo universal. Posteriormente, se procesaron a temperatura ambiente probetas con uno, dos, tres y cuatro pases consecutivos con una velocidad del cabezal de 1 mm/s aplicando la ruta B_C, que consiste en rotar la muestra 90° alrededor de su eje longitudinal cada vez que se reinserta en el canal. Para la caracterización microestructural por microscopía óptica y conocer la respuesta mecánica del material procesado por ECAP se cortaron de cada una de las probetas procesadas muestras en el sentido de la dirección de la extrusión.

Todas las curvas registradas durante el procesamiento de las probetas con uno, dos, tres y cuatro pases consecutivos por la matriz ECAP presentaron el mismo comportamiento iniciándose con un rápido incremento de la fuerza aplicada hasta alcanzar un valor máximo, en el cual la pendiente de la curva cambia y la fuerza comienza a disminuir progresivamente. Tampoco se observaron irregularidades a lo largo de las curvas sugiriendo que los lingotes no presentaron grietas o serraciones durante el proceso de extrusión. Se alcanzaron fuerzas máximas entre 12000 y 18000 N ratificando el incremento de la resistencia del material por efecto de la deformación aplicada.

Los resultados del análisis microestructural de la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La evidenció que con la matriz ECAP y las condiciones experimentales impuestas se consiguió refinar el tamaño de grano del material, obteniéndose en la probeta con cuatro pases consecutivos una reducción de un 64,7% con respecto al tamaño de grano de la aleación sin procesar. En cuanto al aspecto de radio, el cual es una medida de elongación de los granos, se observó un incremento en las probetas con uno y dos pases consecutivos en la matriz ECAP, a partir de allí disminuyó progresivamente alcanzándose en el último cuarto pase un valor semejante al obtenido con un solo pase, sugiriendo que la estructura de grano tiende a adquirir una forma más equiaxial a medida que aumenta la deformación, en concordancia con las predicciones teóricas.

Las medidas de microdureza Vickers mostraron que con solo dos pases la dureza presentó un incremento significativo de un 36,4% en relación a la aleación sin procesar. Este comportamiento sugiere que el proceso por ECAP es una forma eficiente y rápida de mejorar las propiedades mecánicas de los materiales. Con el incremento del número de pases la dureza sigue aumentando, aunque no tan pronunciadamente como en los dos primeros pases con tendencia a la saturación, obteniéndose un aumento de un 43,9% con el último cuarto pase.

Estos resultados muestran que la buena extrusión a temperatura ambiente y el refinamiento microestructural obtenido en la aleación de aluminio Al-Mg-Si-0,14%La en estado de colada hace que la deformación plástica severa por ECAP pudiera tener una buena acogida a nivel industrial para obtener aleaciones comerciales de aluminio con mejores propiedades mecánicas que pueden satisfacer demandas personalizadas para aplicaciones específicas.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/6

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código ORCID / e-mail										
	ROL										
		CA		AS	X	TU		JU			
	ORCID										
	e-mail										
	e-mail										
	ROL										
		CA		AS		TU		JU			
	ORCID										
	e-mail										
	e-mail										
	ROL										
		CA		AS		TU		JU			
	ORCID										
	e-mail										
	e-mail										

Fecha de discusión y aprobación:

Año	Mes	Día
2024	04	16

Lenguaje: spa

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/6

Archivo(s):

Nombre de archivo
NSUATI_PDSY2024

Alcance:

Espacial: IIBCAUDO

Temporal: INTEMPORAL

Título o Grado asociado con el trabajo: Trabajo de Ascenso**Nivel Asociado con el Trabajo: Profesor titular****Área de Estudio: Ciencias de los Materiales****Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado: Universidad de Oriente**

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/6



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CUN°0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Leído el oficio SIBI – 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.



Cordialmente,

JUAN A. BOLANOS CUNPELO
Secretario



C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Teleinformática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YGC/manuja

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso- 6/6

Artículo 41 del REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO (vigente a partir del II Semestre 2009, según comunicación CU-034-2009) : “los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario para su autorización”.



Solange Ysbeth Paredes Dugarte