

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



TESIS

**“ANÁLISIS TRIBOLÓGICO DE UNA ALEACIÓN SECUNDARIA
VACIADA DE AL (MG- ZN- CU) PROCESADA POR ECAP, Y
COMPARATIVO CON UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6
SIN ECAP”**

POR

ING. DARIO PALACIOS ROBLEDO

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

DICIEMBRE, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

**“ANÁLISIS TRIBOLÓGICO DE UNA ALEACIÓN SECUNDARIA
VACIADA DE AL (MG- ZN- CU) PROCESADA POR ECAP, Y
COMPARATIVO CON UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6
SIN ECAP”**

POR

ING. DARIO PALACIOS ROBLEDO

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE, 2018



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis Analisis tribológico de una aleación secundaria vaciada de Al (Mg-Zn-Cu) procesada por ecap, y comparativo con una aleación de aluminio 7075-T6 sin ecap] realizada por el alumno(a) Dario Palacios Robledo, con número de matrícula 1425934, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidades en Materiales

El Comité de Tesis



Dr. Edgar Omar Garcia Sanchez
Director



Dr. Rogelio Deaquino Lara
Revisor



Dr. Marco A.L. Hernandez Rodriguez
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgra



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, por ser tan pacientes y por ayudarme y apoyarme a cumplir mis metas a lo largo de mi vida.

A mis compañeros, por su ayuda en los laboratorios y apoyarme en mi investigación.

Al Dr. Edgar García, por ser un gran mentor durante mis estudios de maestría, y su gran ayuda en la realización de esta investigación.

Y a todas aquellas personas que estuvieron conmigo durante mis estudios de maestría y la realización de esta tesis.

INDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCION	1
1.1 Resumen	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Hipótesis	2
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	3
2.1 Propiedades del aluminio	3
2.3 Aspectos generales de aleaciones aluminio-zinc (serie 7xxx).	4
2.3.1 Aleaciones forjadas	4
2.3.2 Aleaciones fundidas	4
2.3.3 Resistencia a la corrosión.	4
2.3.4 Propiedades mecánicas (Resistencia a la tensión).	5
2.5 Composición química.	5
2.6 Propiedades de la aleación 7075 T6.	6
2.6.1 Características de la masa.	6
2.6.2 Propiedades térmicas.	6
2.6.3 Propiedades eléctricas.	6
2.6.4 Características de fabricación.	6
2.7 Aplicaciones	6
2.7.1. Usos típicos.	6
2.7.2. Precauciones de uso.	6
2.8 Deformación Plástica Severa.	7
2.9 (ECAP).	8
2.9.1 Rutas de procesamiento en ECAP.	9
2.9.2 Sistemas de deslizamiento para las diferentes rutas de procesamiento	9
2.9.3 Los patrones de corte asociados con ECAP	10
2.9.4 La influencia del ángulo abrupto ϕ	12
2.10.1 Tribología	12
2.10.2 Desgaste adhesivo	13
2.10.3 Desgaste abrasivo	13
2.10.4 Desgaste por delaminación.	14
2.10.5 Desgaste por fatiga	14

2.10.6 Propiedades tribológicas de los materiales de grano ultrafino procesados por SPD	15
CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	16
3.1 Caracterización inicial.....	16
3.2 Proceso ECAP	17
3.3 Microdureza Vickers.....	18
3.4 Prueba de Desgaste.....	19
3.5 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	20
3.6 Microscopía Óptica (OM).....	21
CAPITULO 4. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	24
4.1 Composición química.....	24
4.2 Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDX/EDS)	24
4.4 Caracterización Microestructural	27
4.4.1 Microscopía óptica (OM).....	27
4.5 Distribución de segundas fases.....	30
4.6 Microdureza Vickers.....	35
4.7 Análisis Tribológico.....	36
4.7.1 Coeficientes de fricción.....	36
4.7.2 Pérdida de volumen	38
4.7.3 Pérdida de volumen en esferas.....	41
4.8 Huellas de desgaste	42
4.9 Desgaste y mecanismos de desgaste en esferas.....	47
4.10 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o SEM).....	53
CAPITULO 5. DISCUSION	61
5.1 Deformación plástica severa	61
5.2 Microdureza	61
5.3 Microscopía óptica	61
5.4 Microscopía electrónica de barrido.....	61
5.5 Pruebas de desgaste	62
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
6.1 Conclusiones.....	63
6.2. Recomendaciones.....	63
REFERENCIAS	64
TABLAS	74

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 Resumen

En esta investigación se realizó el análisis de una aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado y una aleación de aluminio 7075 T6, y se desarrolló principalmente a partir de un proceso de deformación plástica severa o “SPD” (por sus siglas en ingles), con el fin de refinar la microestructura hasta obtener un tamaño de grano ultra fino. Una vez deformada, se realizaron una serie de pruebas para observar el cambio en las propiedades mecánicas de la aleación secundaria Al (Zn-Mg-Cu) vaciado antes y después del SPD, adicionalmente estos resultados se compararon con los de la aleación de aluminio 7075-T6 sin proceso SPD.

Después de que se aplicó el proceso de ECAP, se hicieron cortes longitudinales, esto con el fin de tener una visión más amplia del refinamiento de grano generado y que, al momento de realizar las siguientes pruebas, se obtuvieran resultados a partir del análisis de la dirección del flujo generado por la deformación plástica severa, y, en el caso de la aleación de aluminio 7075 T6 el análisis se realizó a partir de la orientación del grano provocado por el trabajado en frío.

Posteriormente se seleccionaron 5 diferentes probetas de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado con diferentes tamaños de grano debido al proceso ECAP, y se hicieron pruebas de microdureza en cada una de ellas en un maquina shimadzu HMV con parámetros de 490.3 mN para la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado antes y después del proceso ECAP, y para el caso de la aleación de aluminio 7075 T6 se utilizó una carga de 1.961N. Se realizaron 30 indentaciones por muestra

Se desarrollaron pruebas tribológicas a fin de obtener la resistencia al desgaste en cada una de las muestras, así como también los coeficientes de fricción y los desgastes presentes en las muestras y en las esferas durante y al finalizar cada prueba de desgaste. La caracterización se realizó por medio del microscopio electrónico de barrido (MEB) o (SEM) por sus siglas en inglés, y se tomaron un total de 6 muestras de las cuales 5 eran de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, se obtuvo también por medio del SEM y los espectros de EDS los intermetalicos o segundas fases presentes, así como sus respectivas composiciones.

La composición química se obtuvo por medio del método de espectrometría de emisión óptica por chispa.

El análisis metalográfico de ambas aleaciones fue llevado a cabo por medio de microscopia óptica y usando un analizador de imágenes, este último para aquellas muestras que presentaron un refinamiento de grano ultrafino cercano a los nanómetros debido a la deformación plástica severa.

Parte de los resultados obtenidos fueron, aumento en microdureza por el refinamiento de grano, así como fragmentación y distribución de intermetalicos, por otra parte y la perdida de volumen en ambas aleaciones.

1.2 Objetivos generales

- Mejorar las propiedades mecánicas de la aleación secundaria de Al-Zn-Mg-Cu vaciado por medio del proceso ECAP.
- Evaluar su resistencia al desgaste.

1.3 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del proceso ECAP en las propiedades mecánicas y en la resistencia al desgaste de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.
- Determinar los tipos de desgaste que se presentan antes y después del refinamiento de grano por medio del proceso ECAP.
- Comparar el desgaste generado de aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado con los de una aleación de aluminio 7075 T6.

1.4 Hipótesis

La resistencia mecánica y el desgaste de la aleación puede incrementar debido a un efecto combinado de redistribución de partículas de segunda fase y al refinamiento de grano causado por el proceso ECAP.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Propiedades del aluminio

Las aleaciones de aluminio se producen en cientos de composiciones mediante todos los procesos de fundición comercial, incluidos arena verde, arena seca, molde compuesto, molde de yeso, fundición de inversión, molde permanente, contra-gravedad de baja presión, fundición y presión a presión.

Aluminio, el segundo elemento metálico más abundante en la tierra, entre las características más importantes del aluminio está su versatilidad, así como también el alcance de las propiedades físicas y mecánicas que pueden llegar a ser desarrolladas. Más de trecientas aleaciones son reconocidas comúnmente y se han creado variaciones dentro de las mismas a nivel internacional.

Las propiedades más importantes de este metal y sus aleaciones son: la apariencia, su peso ligero, las propiedades físicas y mecánicas, así como la gran resistencia a la corrosión. El aluminio puro tiene una densidad de 2.7 g-cm^3 que es aproximadamente un tercio del acero, cobre o latón y presenta gran resistencia a la corrosión en diferentes ambientes.

Las superficies del aluminio puro pueden ser altamente reflejantes. Luz radiante, luz visible, calor y ondas electromagnéticas son fácilmente reflejadas. Generalmente presenta excelente conductividad térmica y eléctrica.

La conductividad térmica de las aleaciones de aluminio tiene ventaja en intercambiadores de calor, evaporadores, cabezas de motor y radiadores. Algunas aleaciones de aluminio en casos muy especiales pueden superar la resistencia del acero, pero en general el aluminio puro se caracteriza por ser suave [1].

El aluminio no es tóxico, ni magnético y no produce chispa. La característica no magnética hace al aluminio útil para diversos fines de protección eléctrica, como cajas para barras conductoras o cubiertas para equipo eléctrico.

El aluminio comercialmente puro, aleación 1100 (<99.0% de aluminio), es adecuado para aplicaciones en las que se requiere buena formabilidad o una gran resistencia a la corrosión (o ambas) y en las que no se necesita alta resistencia. Se ha utilizado ampliamente en utensilios de cocina, varios componentes arquitectónicos, equipo de manejo, y almacenamiento de alimentos y agentes químicos, así como en ensamblajes soldados [4].

Las aleaciones han sido clasificadas por la asociación de aluminio, reconocida en Estados Unidos de América, existen dos, una para cada grupo [1].

Tabla I. Clasificación de aleaciones [1].

Trabajadas	Aleante principal	Fundición	Aleante
1xxx	Composición pura	1xx.x	Composición pura
2xxx	Cobre	2xx.x	Cobre
3xxx	Manganeso	3xx.x	Manganeso
4xxx	Silicio	4xx.x	Silicio
5xxx	Magnesio	5xx.x	Magnesio
6xxx	Magnesio y silicio	6xx.x	Sin uso
7xxx	Zinc	7xx.x	Zinc
8xxx	Estaño	8xx.x	Estaño
9xxx	Uso futuro	9xx.x	Sin uso.

2.3 Aspectos generales de aleaciones aluminio-zinc (serie 7xxx).

2.3.1 Aleaciones forjadas

El sistema ternario Al-Zn-Mg Proporciona el mayor efecto de endurecimiento por precipitación de todas las aleaciones de Al. Esta propiedad combinada con densidades ligeramente inferiores a las de las aleaciones de la serie 2xxx, hace que estas aleaciones sean particularmente útiles en estructuras de peso crítico en aeronaves

2.3.2 Aleaciones fundidas

Las aleaciones de Al-Zn-Mg se pueden envejecer naturalmente durante un período de semanas después de la fundición, produciendo un producto moderadamente fuerte que tiene una buena resistencia a la corrosión y maquinabilidad sin un tratamiento térmico post fundición. Sin embargo, las resistencias son sustancialmente menores que las observadas en aleaciones forjadas de Al-Zn-Mg. Las aleaciones son susceptibles envejecer si se calientan en servicio, ya que a menudo sufren problemas de agrietamiento en caliente en moldes permanentes. [3].

2.3.3 Resistencia a la corrosión.

La alta resistencia a la corrosión del aluminio se debe a la formación de una delgada e invisible película de óxido que se forma inmediatamente al exponer las superficies a la atmosfera. Esta película protege al metal de la corrosión. Si se elimina la película de óxido en muchos ambientes, una nueva película se formará de inmediato y el metal permanecerá totalmente protegido. Mediante la adición de cromo y el tratamiento térmico adecuado, la susceptibilidad de estas aleaciones a la corrosión por esfuerzo se ha minimizado. Tiene aplicaciones en las que se requiere alta resistencia en general y buena resistencia a la corrosión, tales como piezas de estructuras para aviones.

2.3.4 Propiedades mecánicas (Resistencia a la tensión).

Las aleaciones 7075 (5.5% de zinc, 2.5% de magnesio y 1.5% de cobre), 7079 (4.3% de zinc, 3.3% de magnesio y 0.6% de cobre) y 7178 (6.8% de zinc, 2.7 % de magnesio y 2.0% de cobre) desarrollan las más altas resistencias tensiles que se pueden obtener en las aleaciones al aluminio y estos valores de resistencia pueden rondar los 145 MPa hasta 538 MPa [4].

2.4 Tratamientos térmicos de las aleaciones de aluminio.

T: **tratado térmicamente.** Se aplica a productos tratados térmicamente, con o sin endurecimiento por deformación suplementario, para producir temples estables. La T sigue de los números 2 al 10, designando una combinación específica de operaciones básicas. Las variaciones deliberadas de las condiciones, que dan lugar a características significativas para el producto, se indican añadiendo uno o más dígitos a la designación básica:

T2: Recocido (solo productos fundidos).

T3: Tratados térmicamente a solución y luego trabajada en frío.

T4: Tratados térmicamente a solución y envejecida en forma natural hasta una condición sustancialmente estable.

T5: Solo envejecido artificial. Se aplica a productos envejecidos artificialmente después de un proceso de fabricación a alta temperatura seguido por enfriamiento rápido, tal como fundición o extrusión.

T6: Tratados térmicamente en solución luego envejecida artificialmente.

T7: Tratados térmicamente en solución luego estabilizada: se aplica a productos en las condiciones de temperatura y tiempo para estabilización son tales que la aleación se lleva más allá del punto de dureza máxima, proporcionando control de crecimiento y/o residuales.

T8: Tratados térmicamente en solución, trabajo en frío y luego envejecida en forma artificial.

T9: Tratados térmicamente en solución, envejecida artificialmente y luego trabajo en frío.

T10: Envejecida artificialmente y luego trabajada en frío, lo mismo que en T5, pero seguida por trabajado en frío a fin de mejorar la resistencia [4].

2.5 Composición química.

Límites de composición de la aleación 7075: 1.20 a 2.0 Cu, 2.1 a 2.9 Mg, 0.30 Mn max, 0.40 Si max, 0.50 Fe max, 0.18 a 0.28 Cr, 5.1 a 6.1 Zn, 0.20 Ti max, 0.05 max de cada otro, 0.15 máximo de otros (total), balance Al (1).

2.6 Propiedades de la aleación 7075 T6.

Tabla II. Propiedades de tensión de la aleación 7075 (5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.23Cr), trabajada. (1).

Temple	Esfuerzo de tensión		Punto de cedencia		Elongación %
	MPa	ksi	MPa	ksi	
Propiedades típicas					
O	228	33	103	15	17
T6, T651	572	83	503	73	11
T73	503	73	434	63	...
Alclad 0	221	32	97	14	17

2.6.1 Características de la masa.

Densidad. 2.80 g/cm³ (0.101 lb/in.³) a 20 °C (68 °F)

2.6.2 Propiedades térmicas.

Temperatura de liquidus. 635 °C (1175 °F)

Temperatura de solidus. 477 °C (890 °F); temperatura eutéctica para material no moldeado como molde o forjado que no ha sido tratado térmicamente en solución.

2.6.3 Propiedades eléctricas.

Conductividad eléctrica. Volumétrica, a 20 °C (68 °F). T6, T62, T651, T652 temple: 33% IACS. Temple T76, T7651: 38.5% IACS. Temple T73, T7351, T7352: 40% IACS

2.6.4 Características de fabricación

Temperatura de recocido. 415 °C (775 °F)

Temperatura de solución. 465 a 480 °C (870 a 900 °F), dependiendo del producto (1).

2.7 Aplicaciones

2.7.1. Usos típicos.

Piezas estructurales de las aeronaves y otras aplicaciones estructurales donde se aplican grandes esfuerzos y donde se requiere resistencia muy alta y buena resistencia a la corrosión.

2.7.2. Precauciones de uso.

Debe tenerse precaución en las aplicaciones de temple T6 donde se encuentran tensiones sostenidas, residuales o aplicadas, particularmente en la dirección transversal del grano. En tales casos, se debe considerar el temple T73, con algún sacrificio en resistencia a la tensión (1).

2.8 Deformación Plástica Severa.

El procesamiento por deformación plástica severa (SPD) puede definirse como: la aplicación de deformación muy alta sobre un sólido sin la introducción de un cambio significativo en las dimensiones totales de éste, y conduciendo a la producción de refinamiento excepcional del grano de manera que, típicamente, los sólidos procesados tengan 1000 o más granos en cualquier sección [6].

Las técnicas de deformación plástica severa (SPD) [1,2 y 3], en la actualidad se aplican extensamente para la producción de microestructuras de grano ultrafino en metales y aleaciones. De los diversos procesos de SPD ahora disponibles, el Equal Channel Angular Pressing (ECAP) o “prensado angular en canales iguales” ha recibido la mayor atención porque puede ser usado fácilmente para la producción de probetas razonablemente grandes (5). En High Pressure Torsión (HPT) o torsión de alta presión, una muestra se puede usar para la fabricación de muestras de tipo de disco (figura 2), se mantiene entre los platos de compresión a varios GPa, un soporte inferior gira y las fuerzas de fricción de la superficie deforman por corte [15]. Por otro lado, la técnica de ARB consiste en imponer una deformación plástica extrema sobre el material, lo que da como resultado un refinamiento estructural y aumento de la fuerza sin cambiar las dimensiones de la muestra [9].

La adhesión acumulativa de rollos (ARB) es un proceso SPD. El ARB es el único proceso de SPD aplicable a la producción continua de materiales voluminosos. En el proceso, el 50% del material laminado se corta en dos, se apila para que sea la dimensión inicial y luego se vuelve a enrollar. Con el fin de obtener un material sólido de un solo cuerpo, el laminado en ARB no es solo un proceso de deformación sino también un proceso de unión (adhesión por laminación) [23].

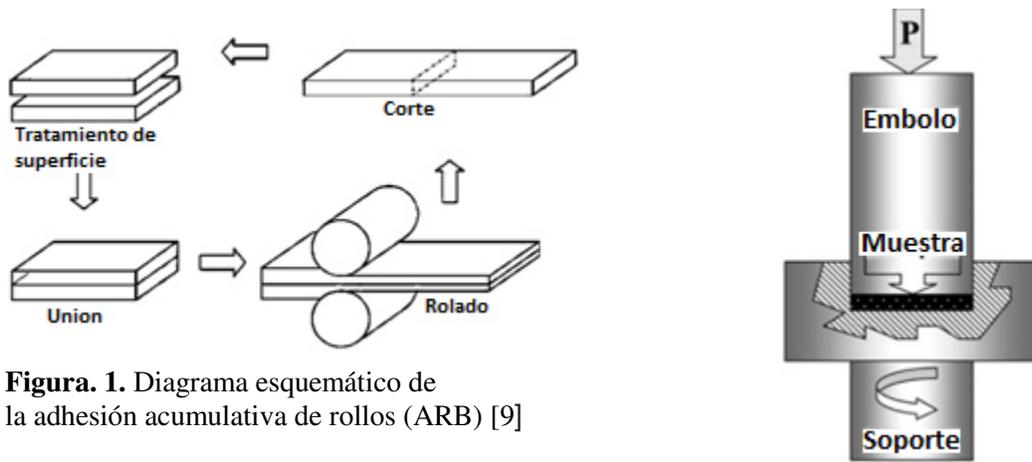


Figura. 1. Diagrama esquemático de la adhesión acumulativa de rollos (ARB) [9]

Figura. 2. Ilustración esquemática del procesamiento HPT (11)

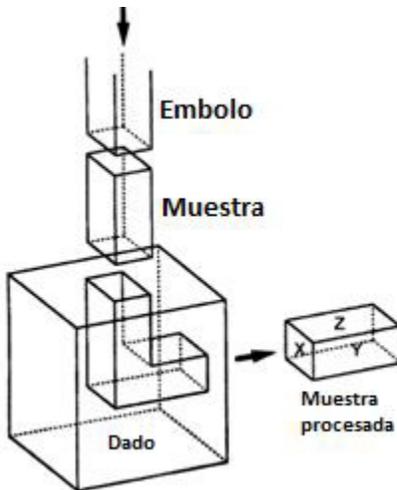


Figura. 3. El principio de procesamiento ECAP, incluyendo la definición de los tres planos ortogonales X, Y y Z [10].

2.9. ECAP

El proceso ECAP induce una deformación plástica severa por cizallamiento o corte simple en la probeta repetidamente a través de un dado con dos canales de sección transversal igual que se intersecan con un ángulo abrupto ϕ , y con un ángulo de curvatura angular Ψ (7). Esto impone una alta tensión en la muestra de modo que incrementa la densidad de dislocaciones, y estas dislocaciones se reorganizan para formar sub-granos o límites de granos. Los resultados muestran que las microestructuras de grano ultrafino producidas por ECAP, exhiben generalmente altas resistencias cuando se ensayan a temperatura ambiente en comparación con sus homólogas de grano grueso (5). Para un material dado, la evolución de la textura depende principalmente de la deformación aplicada (como la ruta de procesamiento, el número de pasadas (N) y el ángulo del dado o ángulo abrupto ϕ , el mecanismo de deformación (por ejemplo, el sistema de deslizamiento)) y la textura inicial (8). En la siguiente figura se muestra cómo se lleva a cabo el cizallamiento durante el proceso ECAP [6].

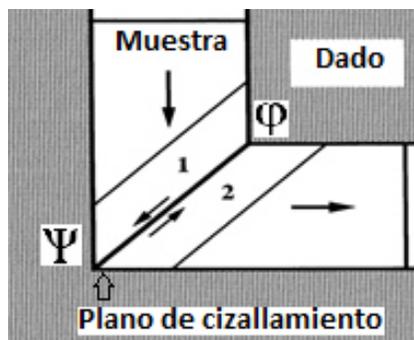


Figura. 4. El principio de ECAP que muestra el plano de cizallamiento dentro del dado, así como el ángulo abrupto ϕ , y el ángulo de curvatura Ψ [6].

2.9.1 Rutas de procesamiento en ECAP.

Las rutas de procesamiento en ECAP entre pasos sucesivos son: **A**, **BA**, **BC** y **C**. En la ruta **A** la muestra se presiona sin rotación, en la ruta **BA** la muestra se hace girar 90° en direcciones alternas entre pasos consecutivos, en la ruta **BC** la muestra se hace girar 90° en el mismo sentido (ya sea en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario a las agujas del reloj) entre cada paso, y en la ruta **C** la muestra es girada 180° entre pasos. También son posibles varias combinaciones de estas rutas, tales como combinar las rutas **BC** y **C** alternando las rotaciones a través de 90° y 180° después de cada paso, pero en la práctica la evidencia experimental hasta la fecha sugiere que estas combinaciones más complejas no conducen a ninguna mejora adicional en las propiedades mecánicas de los materiales prensados. Por consiguiente, la atención se dedica generalmente exclusivamente a las cuatro rutas de procesamiento mostradas en la figura 6 [10].

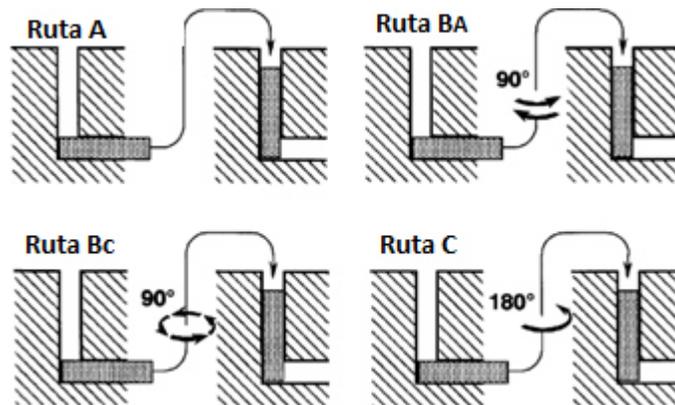


Figura. 5. Las cuatro rutas de procesamiento fundamentales en ECAP (10).

2.9.2 Sistemas de deslizamiento para las diferentes rutas de procesamiento

Los diferentes sistemas de deslizamiento como se muestra en la fig. 6, están asociados con estas rutas de procesamiento en donde los planos X, Y y Z corresponden a los tres planos ortogonales mostrados en la figura 7 y se muestra deslizamiento para diferentes pasos en cada ruta de procesamiento: los planos marcados de 1 a 4 corresponden a los primeros 4 pasos de ECAP. En la ruta **C**, los cizallamientos continúan en el mismo plano en cada paso consecutivo a través del dado, pero la dirección de cizallamiento se invierte en cada paso: así, la ruta **C** se denomina un proceso de deformación redundante y la deformación se restaura después de cada número par de pasos. Es evidente que la ruta **BC** es también un proceso de deformación redundante porque el deslizamiento en el primer paso se anula por deslizamiento en el tercer paso y el deslizamiento en el segundo paso se anula por deslizamiento en el cuarto paso. Por el contrario, las rutas **A** y **BA** no son procesos de deformación redundantes y hay dos planos de cizallamiento separados que se cruzan en un ángulo de 90° en la ruta **A** y cuatro planos de corte distintos que se intersecan en ángulos de 120° en la ruta **BA**. En las rutas **A** y **BA**, existe una acumulación acumulativa de esfuerzo adicional en cada paso separado a través del dado [6].

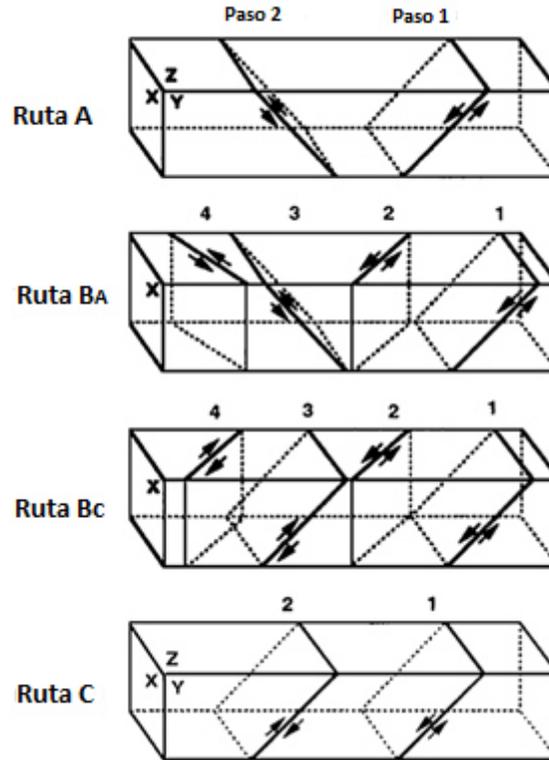


Figura. 6. Los sistemas de deslizamiento vistos en los planos X, Y y Z para pasadas consecutivas usando las rutas de procesamiento A, BA, BC y C [6].

2.9.3 Los patrones de corte asociados con ECAP

Un enfoque valioso en el examen de las implicaciones de ECAP es considerar los patrones de corte que se desarrollan en cada plano ortogonal para cada ruta de procesamiento. La línea superior de la figura 7 muestra el deslizamiento visible en los planos X, Y y Z después de 1 paso (1p) y las líneas restantes muestran los patrones para las rutas A, BA, BC y C después de 2 (2p), 3 (3p) y 4 (4p), respectivamente: hay que señalar que las líneas están codificadas por colores de modo que los colores rojo, malva, verde y azul corresponden al primer, segundo, tercero y cuarto paso, respectivamente [6].

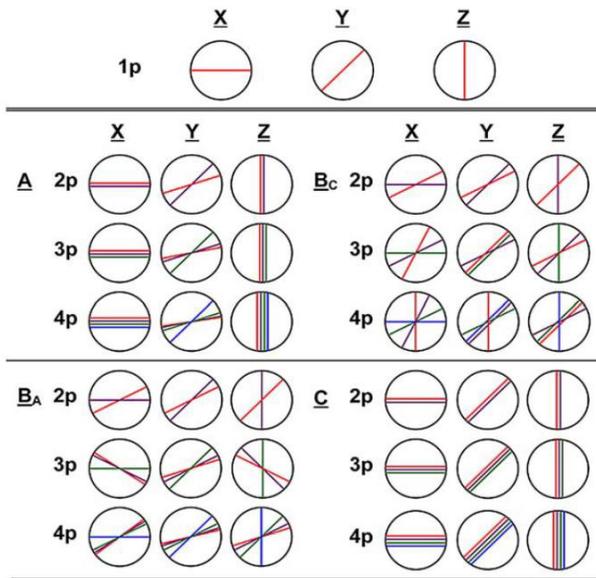


Figura. 7. Los patrones de corte en los planos X, Y y Z para procesar las rutas A, BA, BC y C al presionar 1, 2, 3 y 4 pasan: los colores rojo, malva, verde y azul corresponden al primero, segundo, tercero y cuarto paso respectivamente [10].

Route	Plane	Number of pressings								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
A	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	□	□	□	□	□	□	□
BA	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
BC	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
C	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱

Figura. 8. Las distorsiones introducidas en elementos cúbicos cuando se observan en los planos X, Y y Z para procesar las rutas A, BA, BC y C al presionar de 1-8 pasos [6].

A continuación, se ilustra la apariencia de la microestructura después de 4 pasos por diferentes rutas de procesamiento en ECAP.

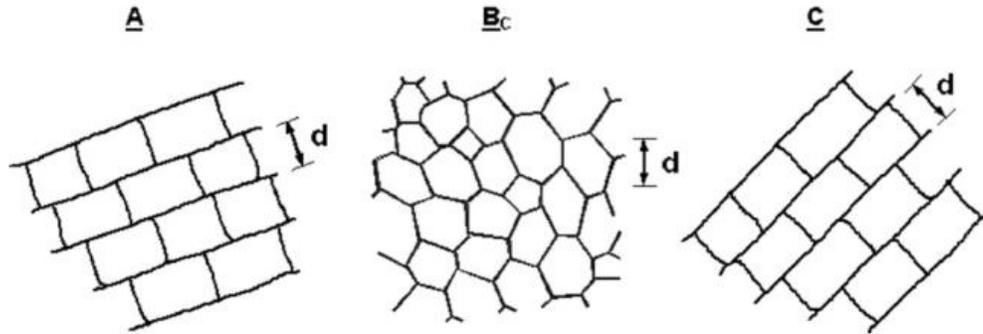


Figura. 9. La microestructura en el plano “Y” después de cuatro pasos en ECAP usando las rutas A, BC y C [10].

De entre las rutas ECAP, la mejor opción en cuanto a conseguir una microestructura equiaxial y homogénea es la ruta Bc, esto se debe a que afecta los tres planos (x,y,z) durante la deformación plástica severa de manera tal que, cada cuatro pasos la microestructura se vuelve equiaxial y homogénea, y se puede observar en la fig. 9, cómo se ven afectados los planos en cada ruta [6].

2.9.4 La influencia del ángulo abrupto ϕ

Durante el proceso ECAP, en la figura 4 se observaron dos ángulos los cuales son ϕ y Ψ , estos llevan por nombre ángulo abrupto y ángulo de arco de curvatura respectivamente. El ángulo en el arco de curvatura, Ψ , tiene un efecto relativamente menor sobre la deformación equivalente, excepto sólo para ángulos de canal inferiores a 90° . Para los dados convencionales en las que el ángulo del canal ϕ es generalmente igual a 90° , la deformación equivalente es cercana 1 para una sola pasada y esta deformación es esencialmente independiente del ángulo que representa el arco de curvatura Ψ . En la siguiente figura se muestran datos con diferentes ángulos ϕ [6].

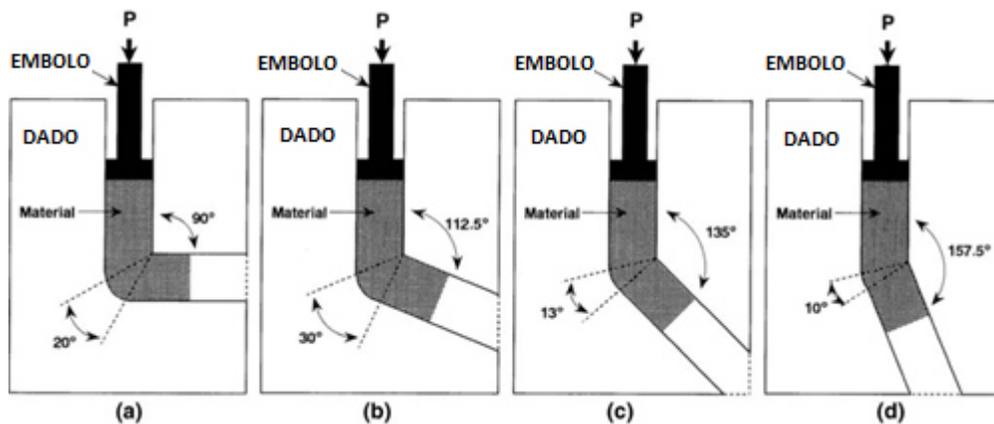


Figura. 10. Ilustración esquemática de los dados utilizados para evaluar la influencia del ángulo del canal, ϕ : los valores de ϕ son (a) 90° , (b) 112.5° , (c) 135° y (d) 157.5° . [6]

2.10.1 Tribología

La tribología se define como la ciencia y la tecnología de las superficies que interactúan en movimiento relativo. Comprende el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación. Siempre

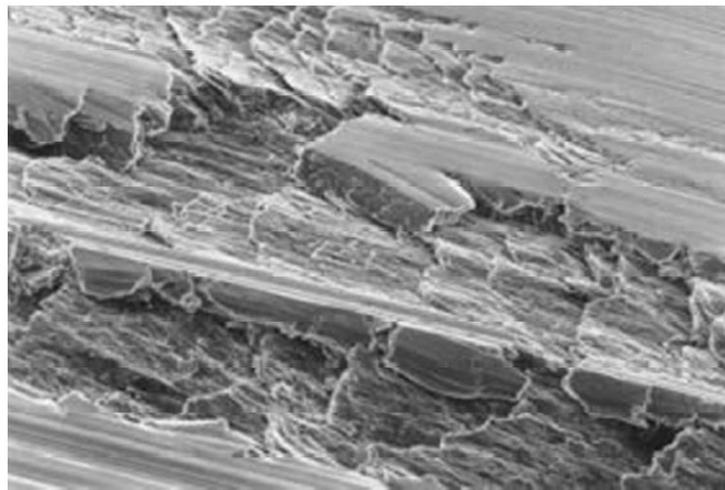
que dos sólidos se tocan, fuerzas de acción y reacción se ponen en juego, se produce una interacción superficial, además, la estructura superficial cambia durante la interacción [12].

Existen diferentes tipos de desgaste: [14].

1. Desgaste adhesivo.
2. Desgaste abrasivo.
3. Desgaste por fatiga.
4. Desgaste por delaminación.

2.10.2 Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos cuerpos sólidos nominalmente planos están en contacto deslizante, ya sea lubricado o no. La adhesión (o unión) se produce en los contactos de aspereza en la interfaz, y estos contactos se cortan por deslizamiento, lo que puede resultar en la separación de un fragmento de una superficie y la unión a la otra superficie. A medida que continúa el deslizamiento, los fragmentos transferidos pueden salir de la superficie y ser traídos de vuelta a la superficie original, o bien formar partículas de desgaste sueltas. Algunos se fracturan por un proceso de fatiga durante la acción repetida de carga y descarga que da lugar a la formación de partículas sueltas [12]. En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de este tipo de desgaste [13].



100µm

Figura. 11. Superficie de la aleación Al-Si que presenta desgaste adhesivo. En ella se observe la formación de partículas [13].

2.10.3 Desgaste abrasivo

Cuando se impone el movimiento tangencial, el material duro se desliza y quita el material blando. Así, el proceso de abrasión incluye varios modos de deformación tales como arado, formación de cuñas y corte. El arado provoca una serie de ranuras como resultado del flujo plástico del material más blando [14].

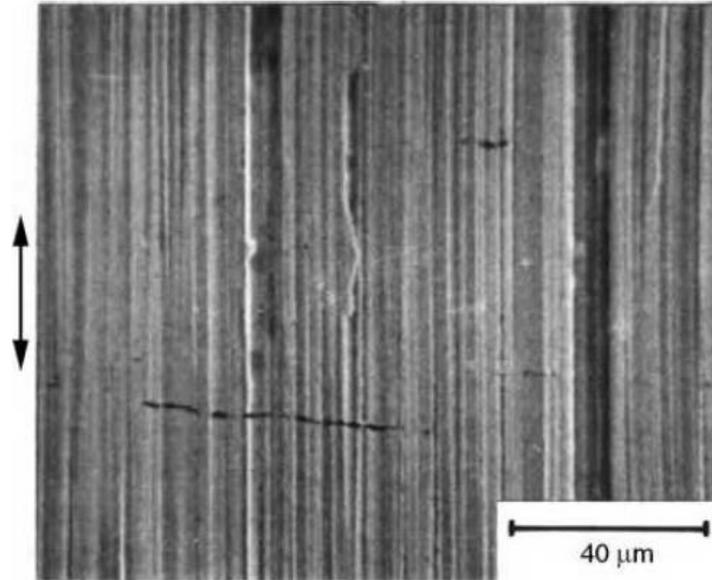


Figura. 12. Micrografía SEM de la superficie del eje de acero inoxidable 303 después de sufrir desgaste abrasivo en condiciones no lubricadas. La dirección de deslizamiento es a lo largo del eje vertical [12].

2.10.4 Desgaste por delaminación.

La teoría de desgaste por delaminación menciona lo siguiente:

- Cuando dos superficies entran en contacto, las cargas normales y tangenciales se transmiten a través de los puntos de contacto. El material en la superficie y muy cerca de la superficie no tiene una alta densidad de dislocación durante el deslizamiento. Esto se debe a la eliminación de las dislocaciones por la fuerza que actúa sobre aquellas dislocaciones que son paralelas a la superficie. Por lo tanto, el trabajo en frío del material muy cerca de la superficie es menor que el de la subsuperficie.
- La tracción superficial ejercida por las asperezas más duras en los puntos de contacto induce deformación de corte plástico incremental que se acumula con carga repetida en el subsuelo. A medida que la deformación subsuperficial continúa, habrá dislocaciones a distancia finita de la superficie. A medida que avanza el tiempo, las dislocaciones conducirán a la formación de micro-huecos o grietas. Así, las grietas son nucleados por debajo de la superficie [14].

2.10.5 Desgaste por fatiga

Los repetidos ciclos de carga y descarga a los que están expuestos los materiales pueden inducir la formación de grietas subsuperficiales o superficiales, que eventualmente después de un número crítico de ciclos dará lugar al desgaste de la superficie con la formación de grandes fragmentos, dejando grandes hoyos, estos hoyos se conocen como pitting. Antes de este punto crítico (que

puede ser cientos, miles o incluso millones de ciclos), se produce un desgaste despreciable, lo que contrasta marcadamente con el desgaste causado por un mecanismo adhesivo o abrasivo [12].



Figura. 13. Desprendimiento subsuperficial en un cojinete [12].

2.10.6 Propiedades tribológicas de los materiales de grano ultrafino procesados por SPD

La correlación de la dureza y el desgaste es limitada porque la propiedad de desgaste de un sistema en la práctica está influenciada por una variedad de factores. Varios estudios han demostrado que mejora la resistencia al desgaste cuando la estructura se ha refinado mediante ECAP hasta obtener un tamaño de grano ultrafino (16), por ejemplo, las propiedades de desgaste de las aleaciones de Al-2,3 y 5% de Cu procesadas por ECAP en condiciones de deslizamiento en seco usando diferentes distancias de deslizamiento y cargas determinaron que hubo menor pérdida de masa (17). También puede suceder lo contrario, que aún y obteniendo un refinamiento de grano ultrafino como es el caso de la aleación de Al-1050, donde se incrementó la pérdida masa si se compara a como fue recibido el material [16].

CAPITULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Caracterización inicial.

Se recibieron 9 muestras de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado en forma de barras cilíndricas con un diámetro de 1cm y una longitud aproximada de 6 cm. Adicionalmente se cortaron 4 muestras con un ancho de 1.5 cm, un largo de 1.2 cm y de alto 1.7 cm aproximadamente, de una placa de aluminio 7075 T6.



Figura 14. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado en un molde.



Figura 15. Probeta obtenida de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.



Figura 16. Imagen de placa de aleación de aluminio 7075 T6, cuyas mediciones son: 75cm x 35cm x 1.5cm.



Figura 17. Imagen de ejemplo de piezas extraídas de placa de aleación de aluminio 7075-T6. Las dimensiones de estas piezas fueron aproximadamente de 1.5 cm x 1.2 cm x 1.7 cm.

3.2 Proceso ECAP

Las probetas de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado se deformaron plásticamente mediante ECAP, para este proceso se consideraron los siguientes parámetros:

- Ruta Bc de 1 a 4 pases
- Lubricante: Disulfuro de Molibdeno (MoS_2).
- Cuatro pasos.
- Temperatura ambiente.
- Angulo abrupto ϕ : 90° .
- Dimensiones de la muestra: 1 cm de diámetro x una longitud aproximada de 6 cm

A continuación, se muestra una imagen representativa del dado de extrusión utilizado y de las características generales del canal del dado ECAP.



Figura 18. Dado de ECAP utilizado.

Las probetas se procesaron desde uno hasta cuatro pases con el objetivo de modificar la microestructura. Estas probetas se utilizaron para evaluar el efecto de la deformación plástica severa sobre las propiedades de desgaste y mecánicas.

3.3 Microdureza Vickers.

Para los ensayos de microdureza se cortaron probetas de manera longitudinal después de ser deformadas por ECAP, probeta de referencia (sin deformación por ECAP), y de la aleación de aluminio 7075 T6 se tomaron secciones de 1.5 cm de ancho, 1.2 cm de largo y 1.7 de alto aproximadamente. Fueron montadas en frío utilizando plastilina epoxy y preparadas mediante desbaste con lijas con un tamaño de grano de 500 hasta 4000 utilizando una pulidora de disco.

Los ensayos de microdureza se realizaron utilizando una carga de 0.5 grf durante 15 segundos. Se realizaron 25 indentaciones a cada una de las muestras para poder obtener un valor promedio representativo en cada condición de procesamiento [25].



Figura 19. Microdurómetro shimadzu utilizado en el ensayo de microdurezas.

3.4 Prueba de Desgaste.

Para realizar las pruebas de desgaste se montaron en frío tres muestras de cada condición, utilizando al igual que las probetas para los ensayos de microdureza la plastilina epoxy, la superficie de todas las muestras (18 en total) se prepararon mediante desbaste y pulido, con el fin de obtener la misma calidad superficial en todas. Las pruebas de desgaste se realizaron siguiendo los parámetros que se presentan a continuación:

- Carga: 3 Kg.
- Velocidad: 100 rpm.
- Diámetro de la esfera del pin: 11.1 mm.
- Material de la esfera del pin: acero inoxidable.
- Tiempo por prueba: 1 hora, con pausas en los tiempos (1, 5, 20, 40 y 60 min).
- Temperatura ambiente.
- Sin medio de lubricación

La figura 20, muestra una vista de la maquina tribológica que se utilizó para las pruebas de desgaste.

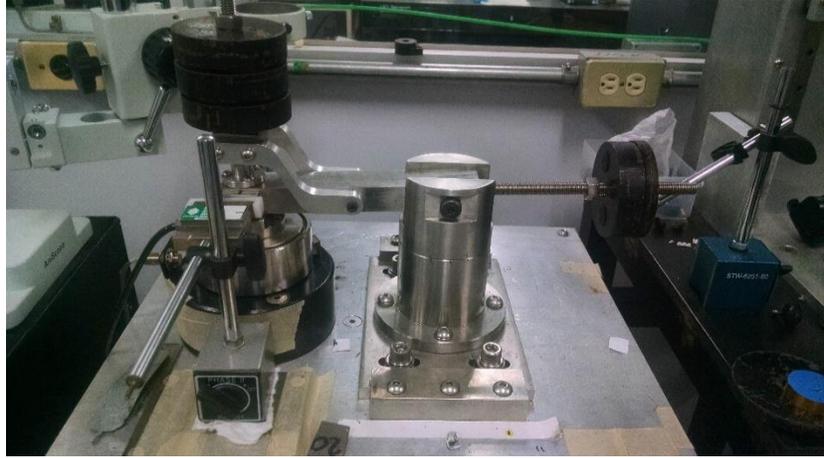


Figura 20. Maquina utilizada para pruebas de desgaste.

Con las pruebas de desgaste se obtuvieron los coeficientes de fricción, las distancias recorridas y los tipos de desgaste presentes durante y al final de las pruebas, esto permitió comparar los resultados, además de evaluar sistemáticamente el efecto de la deformación plástica severa provocada por el proceso ECAP.

3.5 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Las muestras de desgaste fueron analizadas mediante microscopia electrónica de barrido, con esta técnica se determinaron las características y los mecanismos de desgaste en las diferentes condiciones.



Figura 21. MEB Hitachi SU8020 utilizado para análisis de muestras.

El análisis de huellas por medio de MEB se realizó en muestras representativas de cada paso (de referencia, ECAP y del aluminio en condición T6), esto debido a que la reproducibilidad de las pruebas de desgaste fue muy alta.

3.6 Microscopia Óptica (OM).

También se realizó un análisis metalográfico en secciones longitudinales de las probetas, en la dirección del flujo del material durante la extrusión (ECAP), así mismo se realizó de manera transversal un corte a una probeta de aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado (previo al ECAP),. Para la aleación de aluminio 7075-T6 el análisis se realizó en el sentido de la deformación. Las muestras se montaron en frío utilizando plastilina epóxy para evitar con este método el calentamiento de las muestras que pudiera modificar las características microestructurales. Después del proceso de corte y montaje, las muestras fueron desbastadas y pulidas de manera convencional utilizando lijas de tamaño de grano de 500, 800, 1200, 2400 y 4000. En la Figura 23 se muestra la pulidora utilizada para el desbaste de las muestras.



Figura 22. Pulidora Struers Lab Pol-1 utilizada para desbastar las muestras.

Después del pulido las muestras se observaron en un Microscopio Óptico (OM), el tamaño de los granos e información de los intermetalicos presentes. En la Figura 24 se muestra el Microscopio Óptico utilizado para realizar el análisis.



Figura 23. Microscopio Óptico Nikon Epiphot utilizado para analizar las muestras.

Se utilizó el reactivo Barker's para poder revelar los granos y observarlos con el microscopio óptico, en la figura 25 se muestra el sistema utilizado para el ataque electrolítico de la superficie de las muestras.

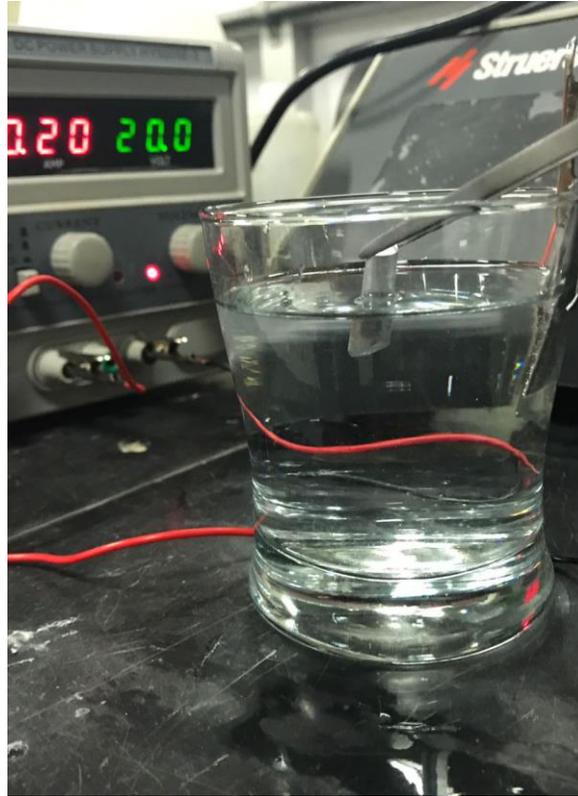


Figura 24. Celda electrolítica para el ataque de muestras con reactivo barker's.

Para el ataque se utilizaron voltajes de 16 a 20 y tiempos de 3 a 5 minutos, y la composición utilizada del reactivo barker's fue de 5 ml de ácido hidrofúorobórico (HBF_4) y 200 ml de agua destilada.

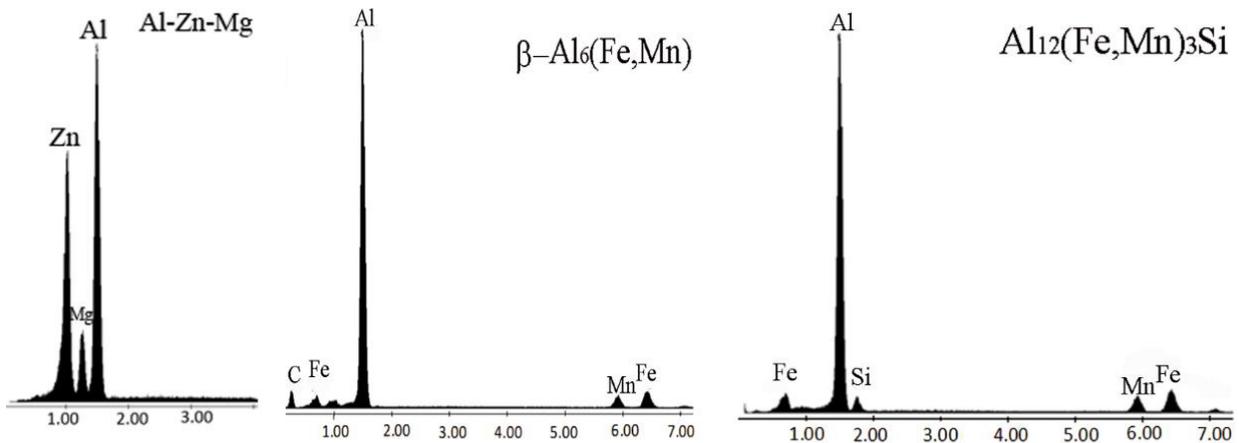
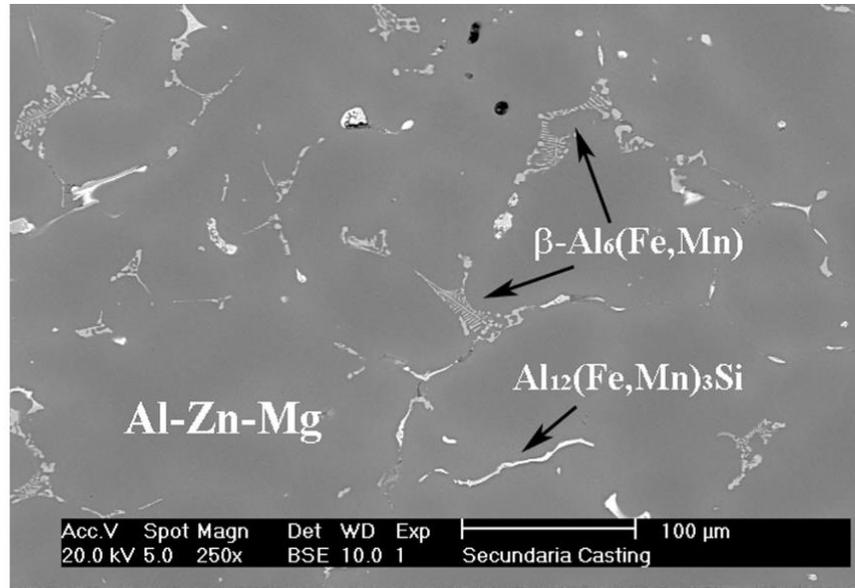


Figura 25. Micrografía del MEB y los espectros de EDS de las fases que constituyen la aleación secundaria Al-Zn-Mg obtenida de la reducción del ZnO en aluminio secundario.

En esta imagen se puede observar una distribución homogénea con morfologías alargadas en las fases presentes, estructuras dendríticas y diferente tonalidad de grises. La imagen se obtuvo usando electrones retrodispersados, esto permite asociar el tono de grises con la composición química, en donde es bien sabido que regiones más brillantes (blancas) corresponden a fases de mayor peso atómico.

CAPITULO 4

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Composición química.

Se realizó un análisis químico de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado mediante espectrometría óptica de emisión por chispa, la tabla III muestra los resultados de los análisis de composición química y la tabla IV presenta la composición nominal de la aleación 7075,

Tabla III. Composición química de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, obtenida por el método de espectrometría óptica de emisión por chispa.

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sr	Ti
%	0.274	0.415	0.202	0.761	0.449	0.018	0.011	2.45	0.0006	0.12

Como puede observarse comparando la tabla III y IV, la aleación de estudio tiene niveles más bajos de elementos de aleación principales en comparación con la composición nominal de un 7075 de acuerdo con ASM (1). Se observa Cu, Zn, Mg en niveles por debajo de la norma. También se puede apreciar un relativamente alto contenido de Mg más del doble del 7075 (ASM). Esto hace que la respuesta a la deformación y a tratamientos térmicos, así como las propiedades mecánicas, no pueden ser relacionadas al menos directamente con la aleación 7075.

Sin embargo, este estudio contempla la comparación con esta aleación por la cercanía en la composición global.

Tabla IV. Composición química nominal de la aleación de aluminio 7075. Según la ASM (1).

Elemento	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Otros (Individual)	Otros total
%	1.20 – 2.0	2.1- 2.9	Max 0.30	Max 0.40	Max 0.50	0.18- 0.28	5.1- 6.1	Max 0.20	Max 0.05	Max 0.15

4.2 Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDX/EDS)

Se realizaron análisis de EDS a la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado mediante Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDX/EDS), para determinar cualitativamente los elementos aleantes presentes en el material, y en general la composición de los intermetálicos presentes. Esta información permitió además hacer análisis comparativos con los resultados de espectroscopía óptica

La figura 25 muestra una micrografía representativa y los espectros de EDS correspondientes a las fases indicadas, con esta información se determinó que la aleación secundaria Al-Zn-Mg está constituida de una matriz de AlZnMg y segundas fases que corresponde a los intermetálicos $Al_6(Fe,Mn)$ y $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$, Esta última debido a que la aleación tiene un contenido de silicio de 0.292% y hierro de 0.56%, cantidades suficientes para que en conjunto con el manganeso se pueda formar.

4.3 Proceso ECAP

De la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, se maquinaron probetas y fueron procesada a través del proceso ECAP, con el fin de conseguir un refinamiento de la microestructura hasta obtener un tamaño de grano ultrafino, la fuerza aplicada fue de 10.2 toneladas en promedio. En las imágenes 26-29, se muestran las probetas deformadas.



Figura 26. Imagen de la probeta después del primer paso (ECAP). Diámetro de 10 mm y longitud de 5 cm aproximadamente.



Figura 27. Imagen de la probeta después del segundo paso (ECAP). Diámetro de 10 mm y longitud de 4.5 cm aproximadamente.



Figura 28. Imagen de la probeta después del tercer paso (ECAP). Diámetro de 10 mm y longitud de 4 mm aproximadamente.



Figura 29. Imagen de la probeta después del cuarto paso (ECAP). Diámetro de 10 mm y longitud de 3.5 cm aproximadamente.

De la figura 26 a la 29, se muestra el desarrollo del proceso ECAP aplicado a las piezas de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado hasta el cuarto paso. Se observa que en el primero y segundo no se aprecian grietas, pero en el tercer paso que se ilustra en la figura 28 se puede notar la presencia de una grieta. La formación de grietas en este proceso se debe a los esfuerzos de tensión generados entre la probeta de aluminio y el canal del dado ECAP en combinación con el endurecimiento acumulado debido a los pasos previos. Ya en el cuarto paso aplicado a la probeta,

se puede ver que ya hay mayor presencia de grietas, por tal motivo, cuatro fue el número máximo de pasos a las que fue sometida la aleación

4.4 Caracterización Microestructural

El análisis microestructural en las diferentes condiciones de procesamiento en ambas aleaciones se realizó utilizando microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB) [27].

Este análisis permitió comparar las características microestructurales en función del número de pasos y las condiciones iniciales. el tamaño de grano, la distribución de partículas de segundas fases, además en algunos casos bandas de deformación en la dirección del flujo del material (24)

4.4.1 Microscopía óptica (OM)

Las muestras de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, desde el estado de colada hasta el paso 4, y a las muestras de la aleación de aluminio 7075 T6, se analizaron por Microscopía óptica, y se obtuvieron las siguientes imágenes:

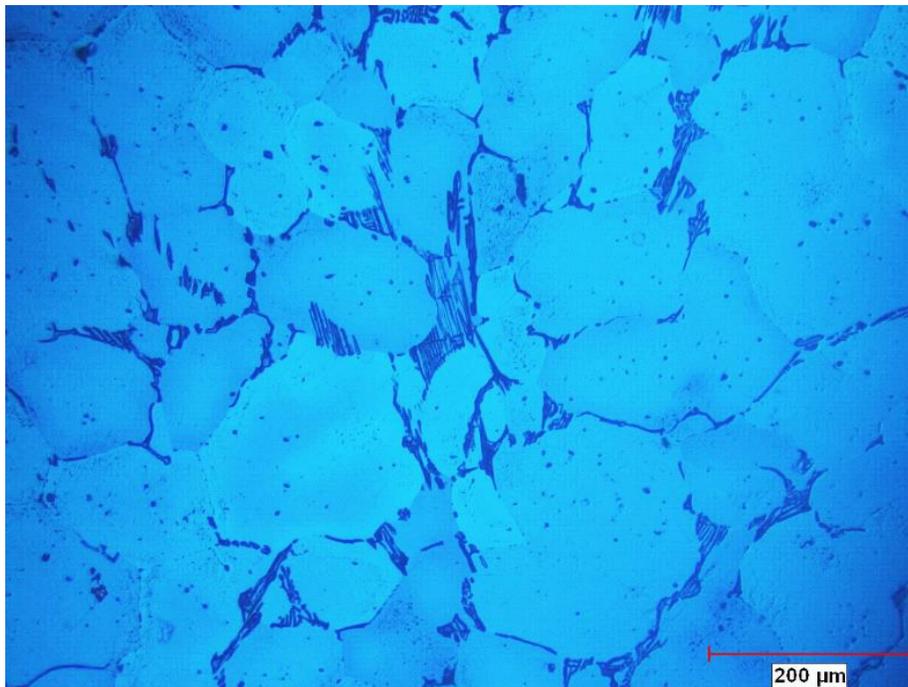


Figura 30. Imagen de la sección transversal de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, capturada con Microscopio Óptico a 100X. Tamaño de grano promedio de 113 μm .

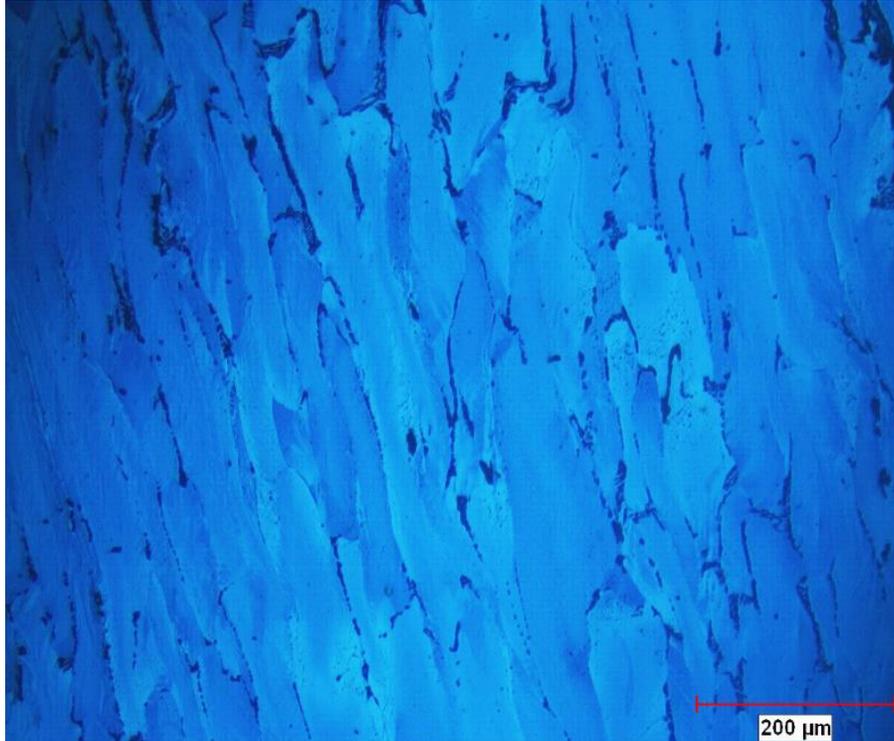


Figura 31. Imagen del paso 1 en ECAP, capturada con Microscopio Óptico a 100X. Tamaño de grano promedio de 52 μm .

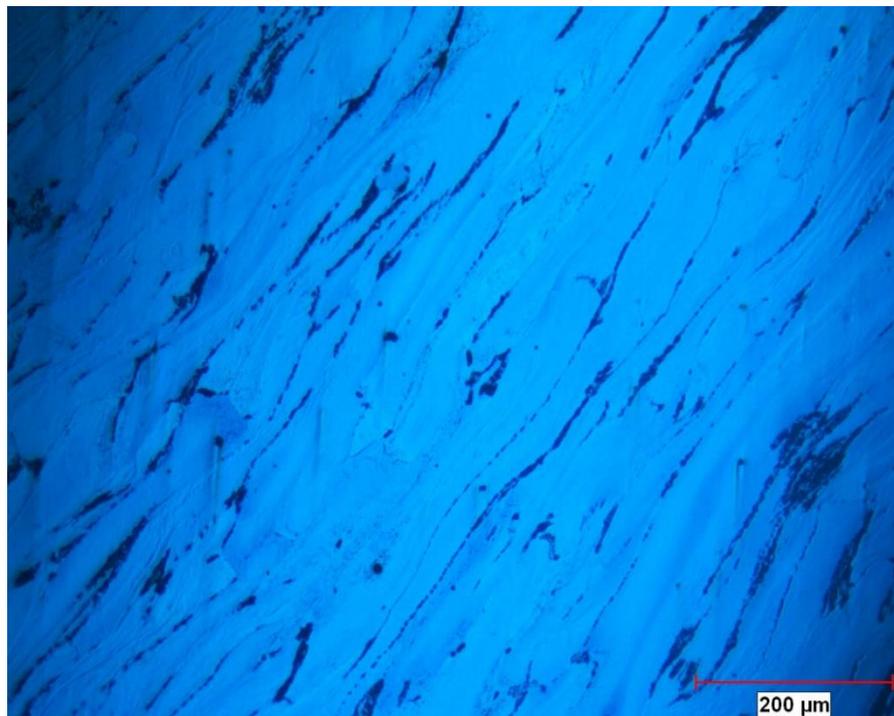


Figura 32. Imagen del paso 2 en ECAP, capturada con Microscopio Óptico a 100X. Tamaño promedio de grano de 39 μm .

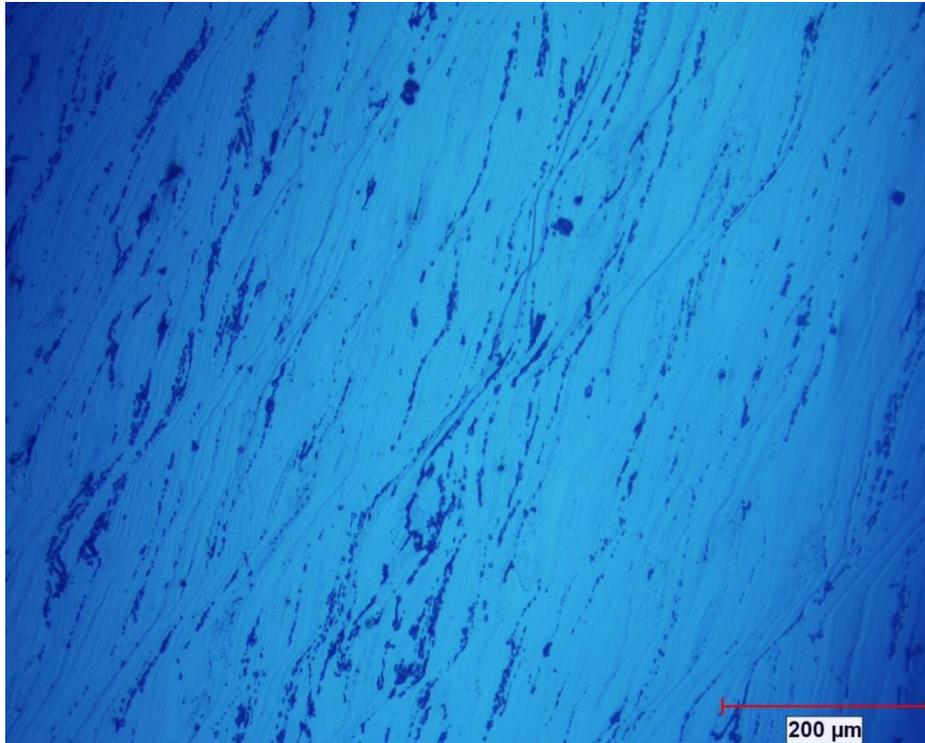


Figura 33. Imagen del paso 3 en ECAP, capturada con Microscopio Óptico a 100X. tamaño de grano promedio de 18 μm.

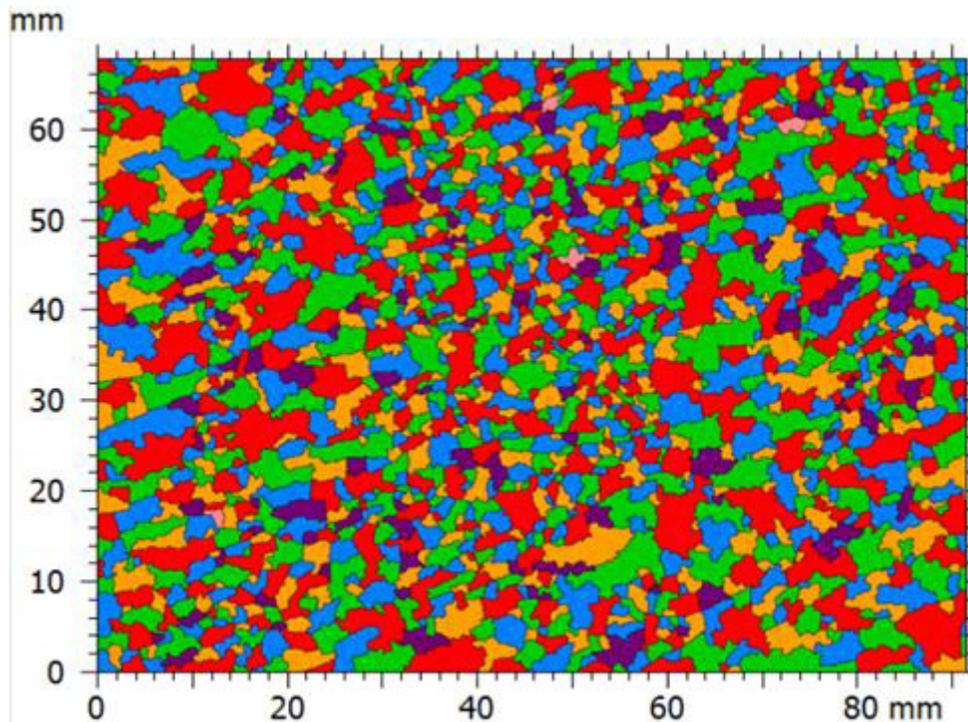


Figura 34. Imagen del paso 4 en ECAP, se obtuvo por medio de un analizador de imágenes llamado mountainsmap. Tamaño promedio de grano de 16 μm.

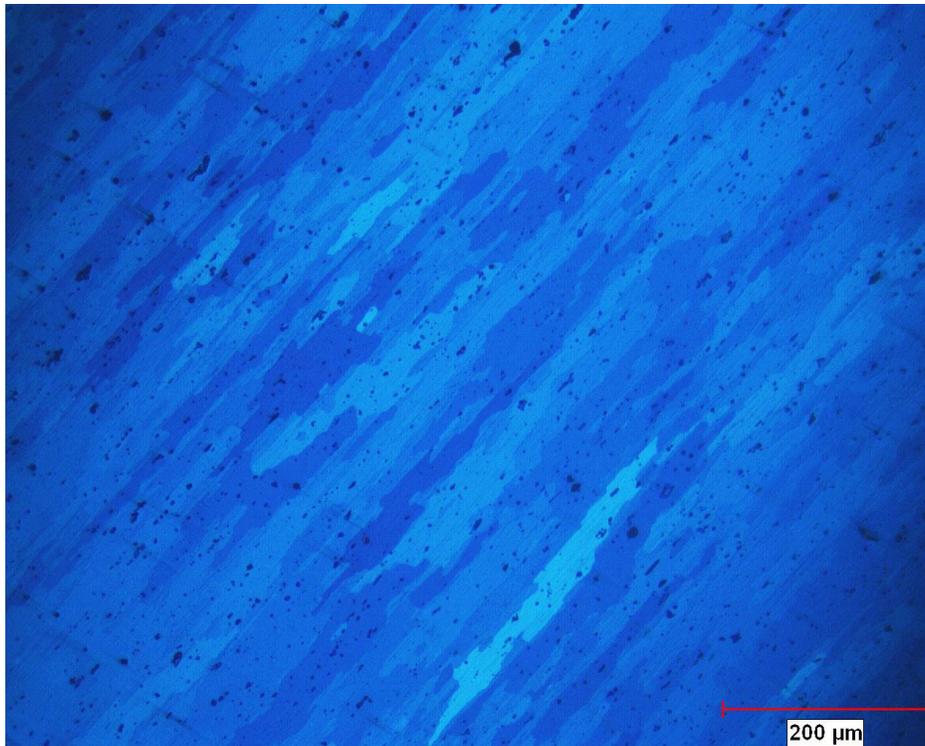


Figura 35. Imagen de la aleación Al 7075-T6, capturada con Microscopio Óptico a 100X. Tamaño promedio de grano de 38 μm .

Al comparar las imágenes, puede observarse (figura 30) el tamaño de grano y los intermetálicos que se presentan en la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado son más grandes en comparación de las figuras 31 a la 33 (paso 1 a paso 3 respectivamente), en donde se aprecia una microestructura deformada, granos alargados y es posible también identificar una distribución diferente de los intermetálicos, en general esta condición de granos con alta deformación lleva a un refinamiento de grano. La figura 34, la cual es una imagen representativa de la muestra con cuatro pasos, se obtuvo por medio de un analizador de imágenes, y se aprecia que la microestructura es más fina si se compara con el paso 3 (figura 33), y a su vez, los granos ya no están alargados, son más equiaxiales (10) y con un diámetro promedio de 16 μm . En la figura 35, se muestra la microestructura de la aleación de aluminio 7075 T6, en ella puede observarse que el tamaño de grano es un poco más grande que en la muestra procesada por ECAP con tres pasos, pero menor al obtenido en la muestra con dos pasos, la microestructura es alargada en la dirección del flujo del material durante la laminación, y también se observan segundas fases distribuidas aleatoriamente.

4.5 Distribución de segundas fases

La distribución de segundas fases en las muestras procesadas por ECAP se obtuvo mediante MEB y se presenta en las siguientes figuras.

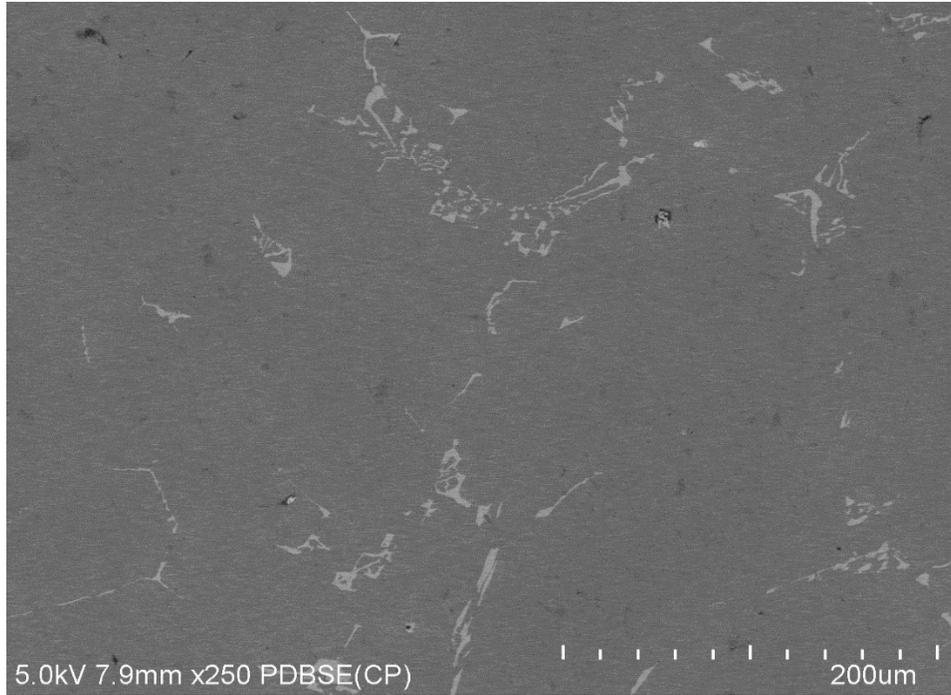


Figura 36. Imagen de MEB de la aleación Al (Zn-Mg-Cu) vaciado

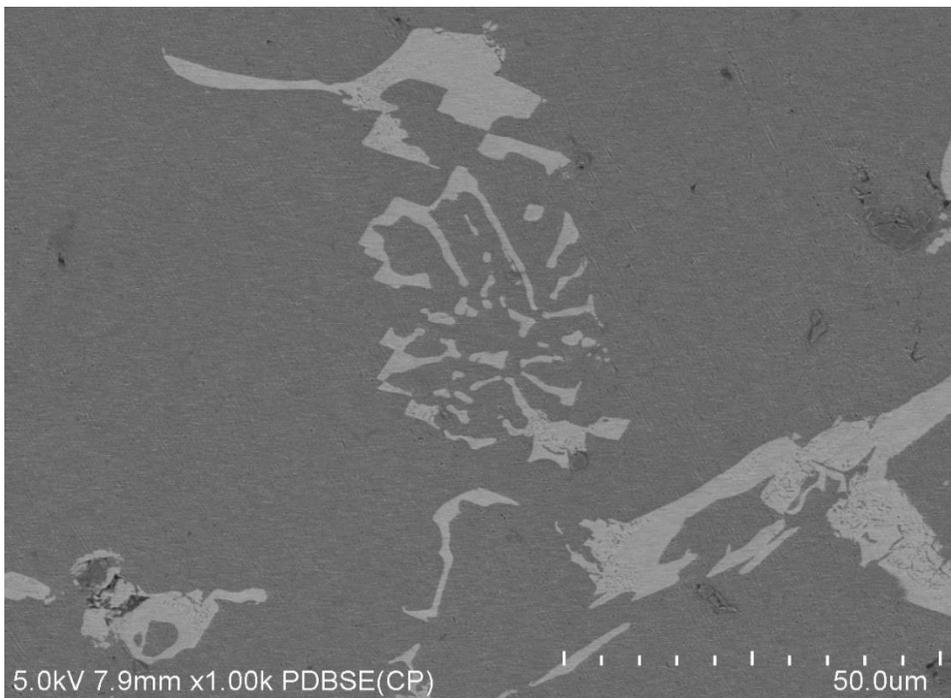


Figura 37. Imagen capturada con MEB Al (Zn-Mg-Cu) vaciado



Figura 38. Imagen capturada con MEB después del primer paso ECAP.

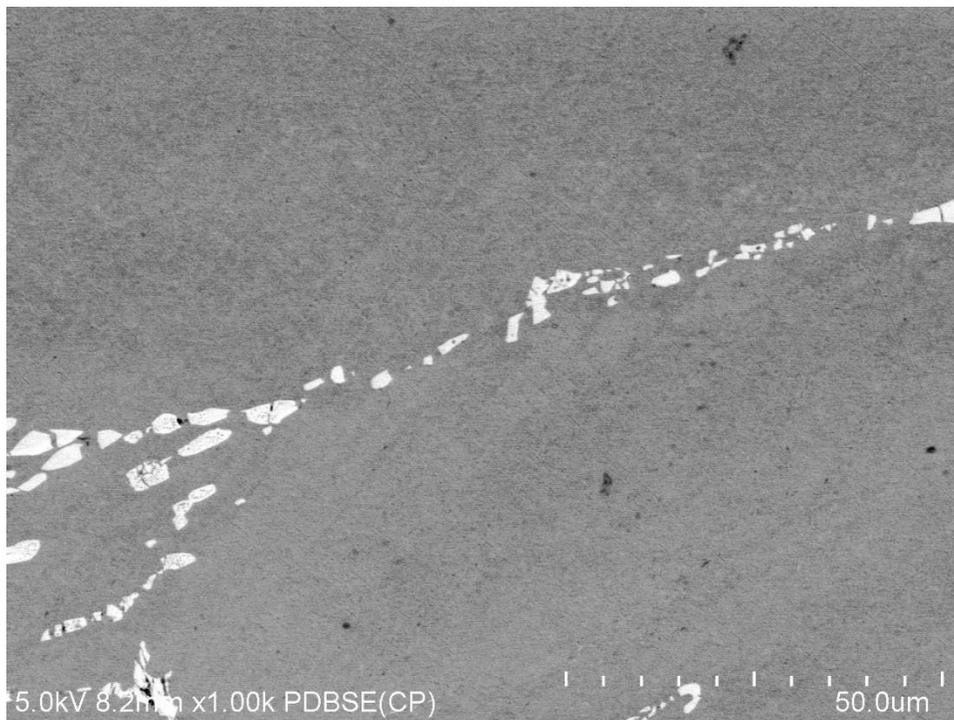


Figura 39. Imagen capturada con MEB después del primer paso ECAP.

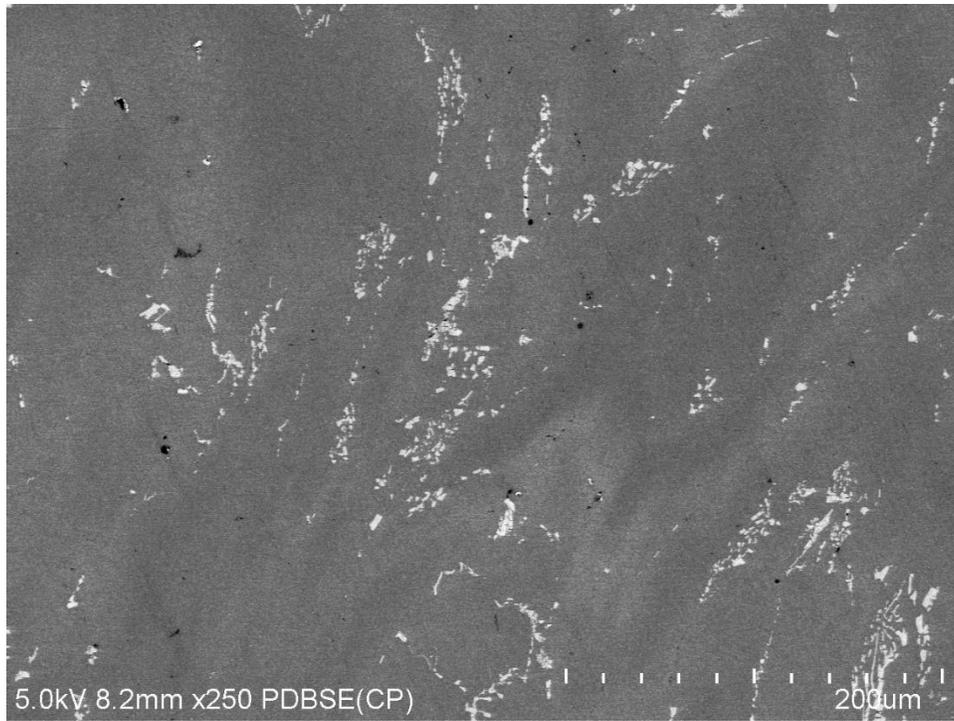


Figura 40. Imagen capturada con MEB después del cuarto paso ECAP.

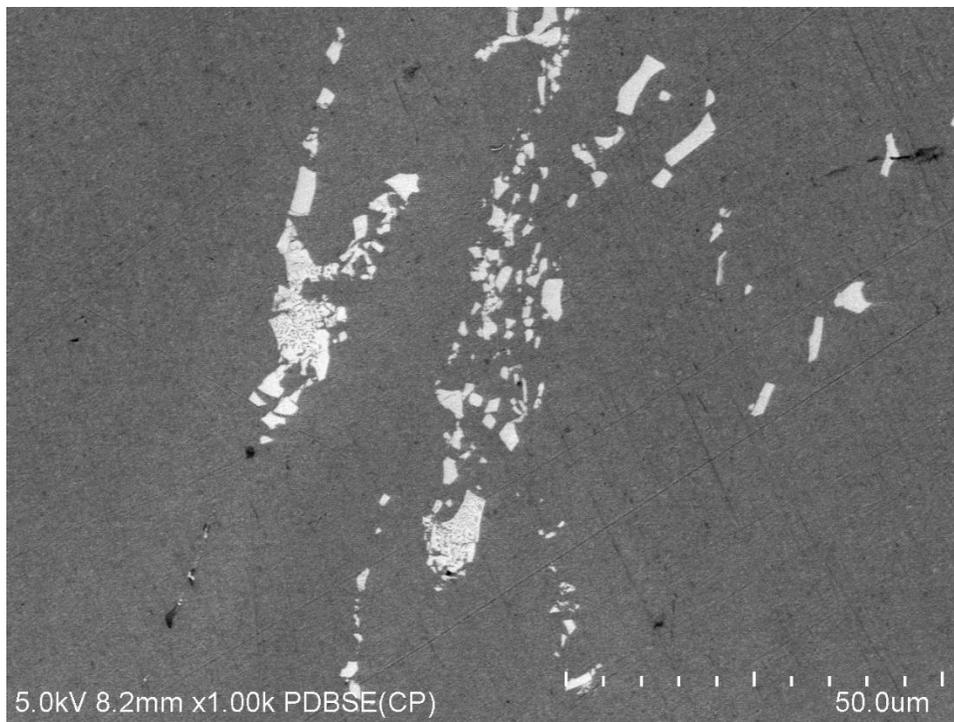


Figura 41. Imagen capturada con MEB después del cuarto paso ECAP.

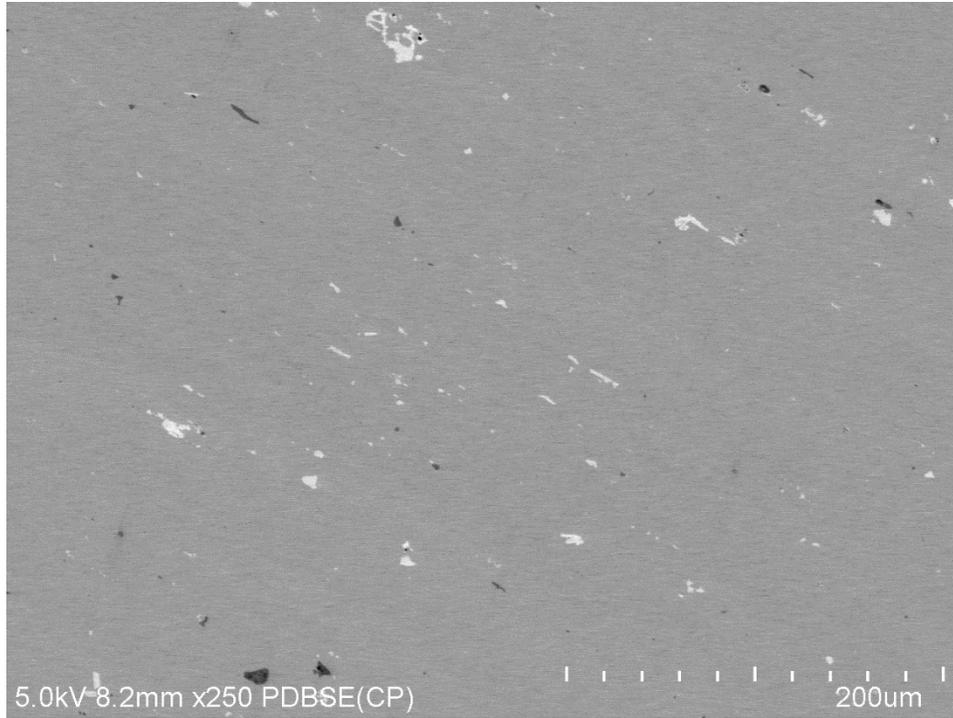


Figura 42. Imagen de MEB de la aleación Al 7075 en condición T6.

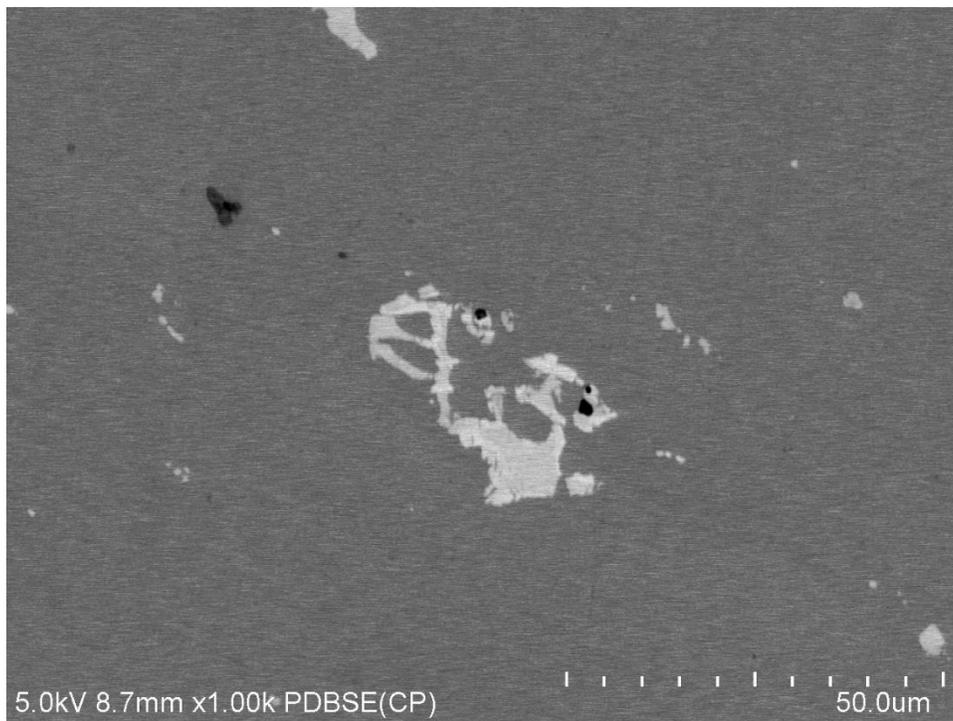


Figura 43. Imagen de MEB de la aleación Al7075 en condición T6.

Se aprecia que en las figuras 36 y 37 las cuales corresponden a la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, las segundas fases son más gruesas al compararlas con las muestras procesadas por ECAP, las figuras 38 y 40 las cuales corresponden a muestras con uno y cuatro pasos respectivamente, la distribución de las segundas fases es un tanto similar una de otra, es decir, se distribuyeron en dirección del flujo de la deformación, así como también, en las figuras 39 y 41 (paso uno y cuatro respectivamente) nos indican que se llevó a cabo una fragmentación de segundas fases, y dicha fragmentación es similar en ambas, por lo que, el tamaño de los intermetalicos no varió significativamente aun después de llevar hasta el pase cuatro la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado. Por otra parte, las segundas fases de la Aleación de aluminio 7075-T6, son más finas y están más homogéneamente distribuidas, y esto nos da como resultado mejores propiedades mecánicas en comparación a los resultados obtenidos en muestras procesadas por ECAP.

4.6 Microdureza Vickers.

Para evaluar las propiedades mecánicas se realizaron ensayos de microdureza Vickers en las aleaciones de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado antes y después del proceso ECAP, y en la aleación de aluminio 7075 T6. Los resultados fueron considerados para el análisis tribológico y permitieron establecer una relación entre las condiciones microestructurales y el comportamiento mecánico. Los resultados de este estudio se muestran a continuación:

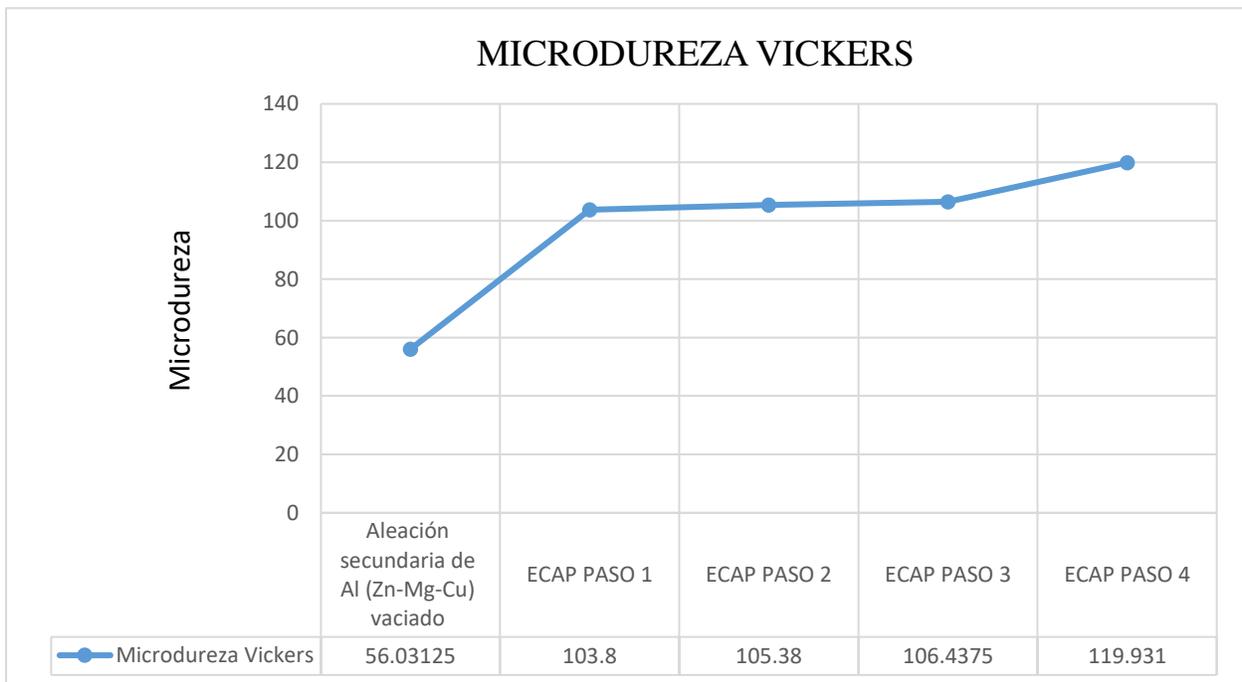


Figura 44. Análisis comparativo de las microdurezas de todas las muestras procesadas por ecap.

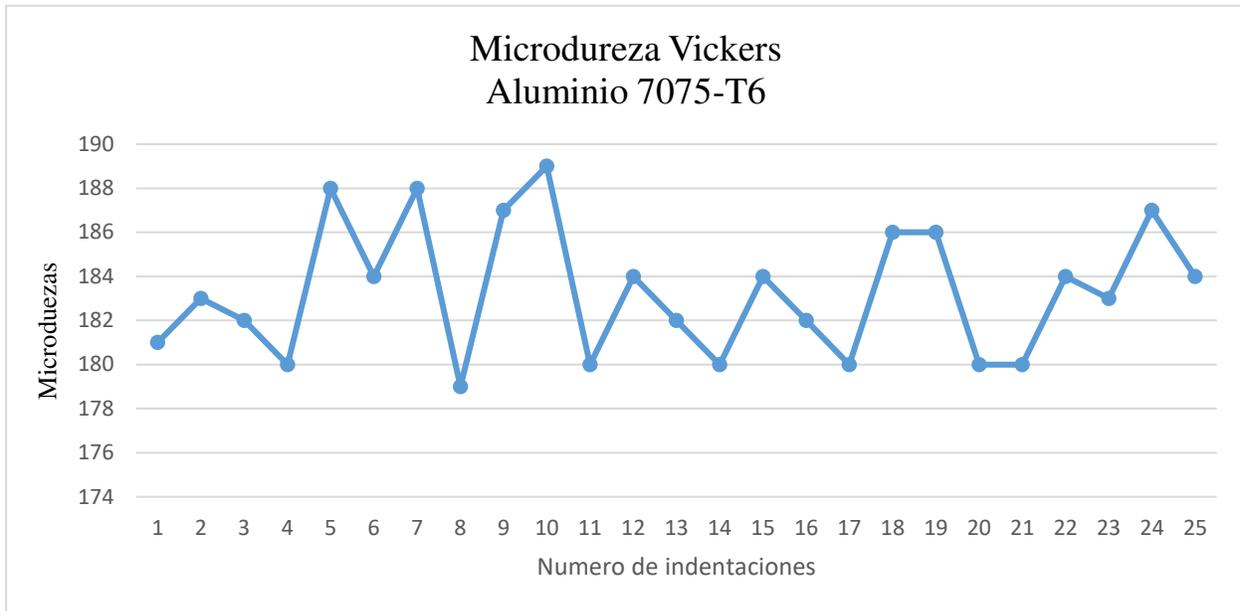


Figura 45. Microdurezas obtenidas en la aleación de aluminio 7075-T6, el promedio de microdureza es de 183.32 HV.

En la figura 44 se observa cómo aumenta la microdureza de la aleación Al (Zn-Mg-Cu) desde la condición de vaciado hasta el paso cuatro de ECAP, este comportamiento es debido a la acumulación de la deformación plástica y el refinamiento de grano, sin embargo, se puede observar que en la figura 45, la aleación Al-7075 T6 tiene mayor dureza que la aleación Al (Zn-Mg-Cu) después del cuarto paso ECAP, esto puede relacionarse con los precipitados (su distribución y tamaño), además del tamaño de grano, y en este caso a la diferencia en composición química entre la aleación 7075 y la aleación de estudio.

La curva de dureza para esta aleación (vaciada) presenta un comportamiento poco común, en donde la dureza no muestra un incremento significativo con el número de pases. La naturaleza de la aleación (estructura de vaciado) requiere mayor número de pases y probablemente ciclos combinados de deformación y alta temperatura para lograr reducir el tamaño de grano de manera significativa y poder observar un incremento evidente en los valores de dureza y en general en las propiedades mecánicas.

4.7 Análisis Tribológico.

4.7.1 Coeficientes de fricción.

Durante las pruebas de desgaste se obtuvieron los coeficientes de fricción. Cada prueba fue sin lubricación, es decir, fue en seco, y tuvieron una duración de 60 min con cinco pausas a los 1, 5, 20, 40 y 60 min. Los resultados se muestran a continuación en las siguientes graficas:

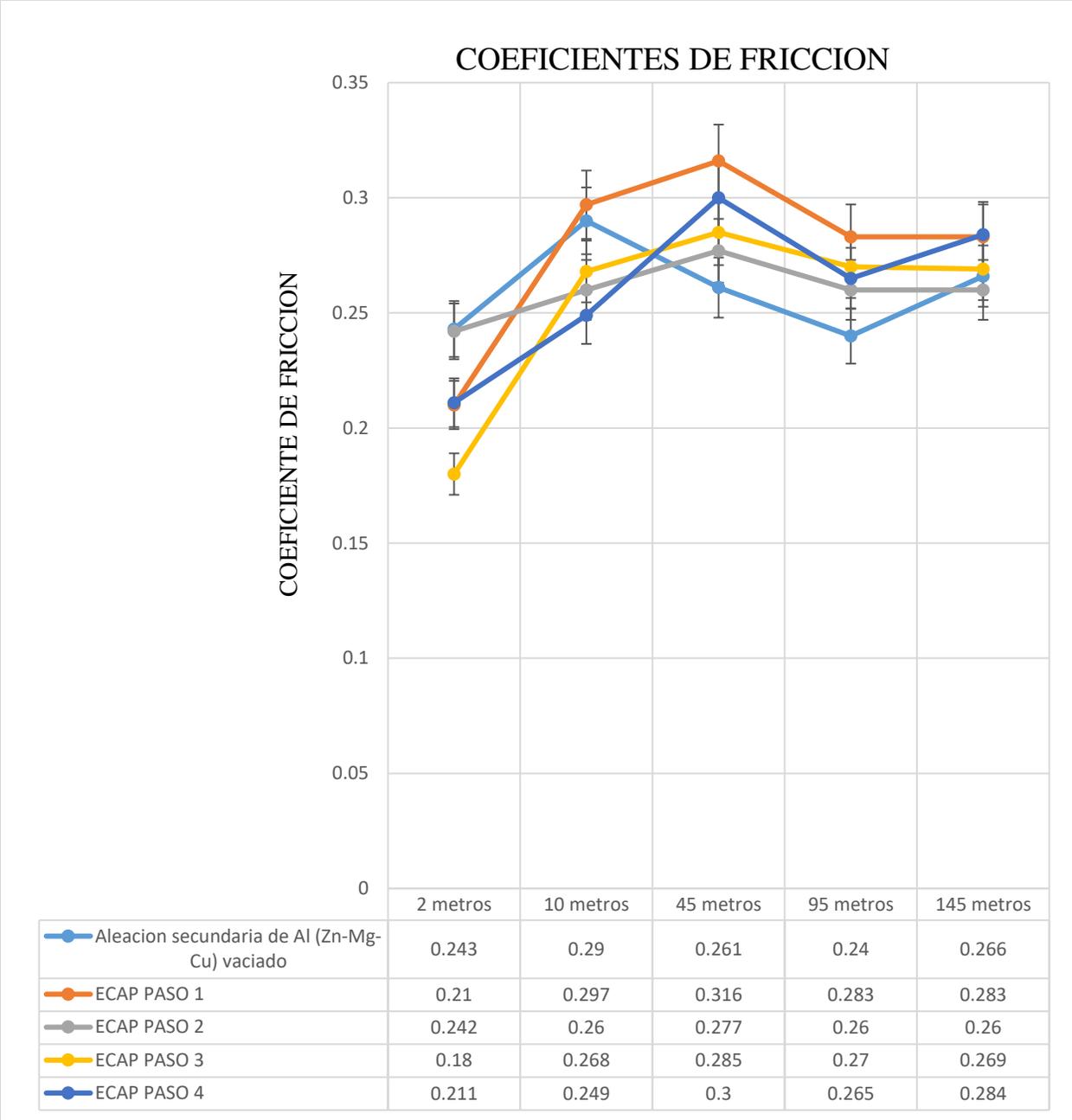


Figura 46. Grafica de los coeficientes de fricción de los tres muestreos en ECAP

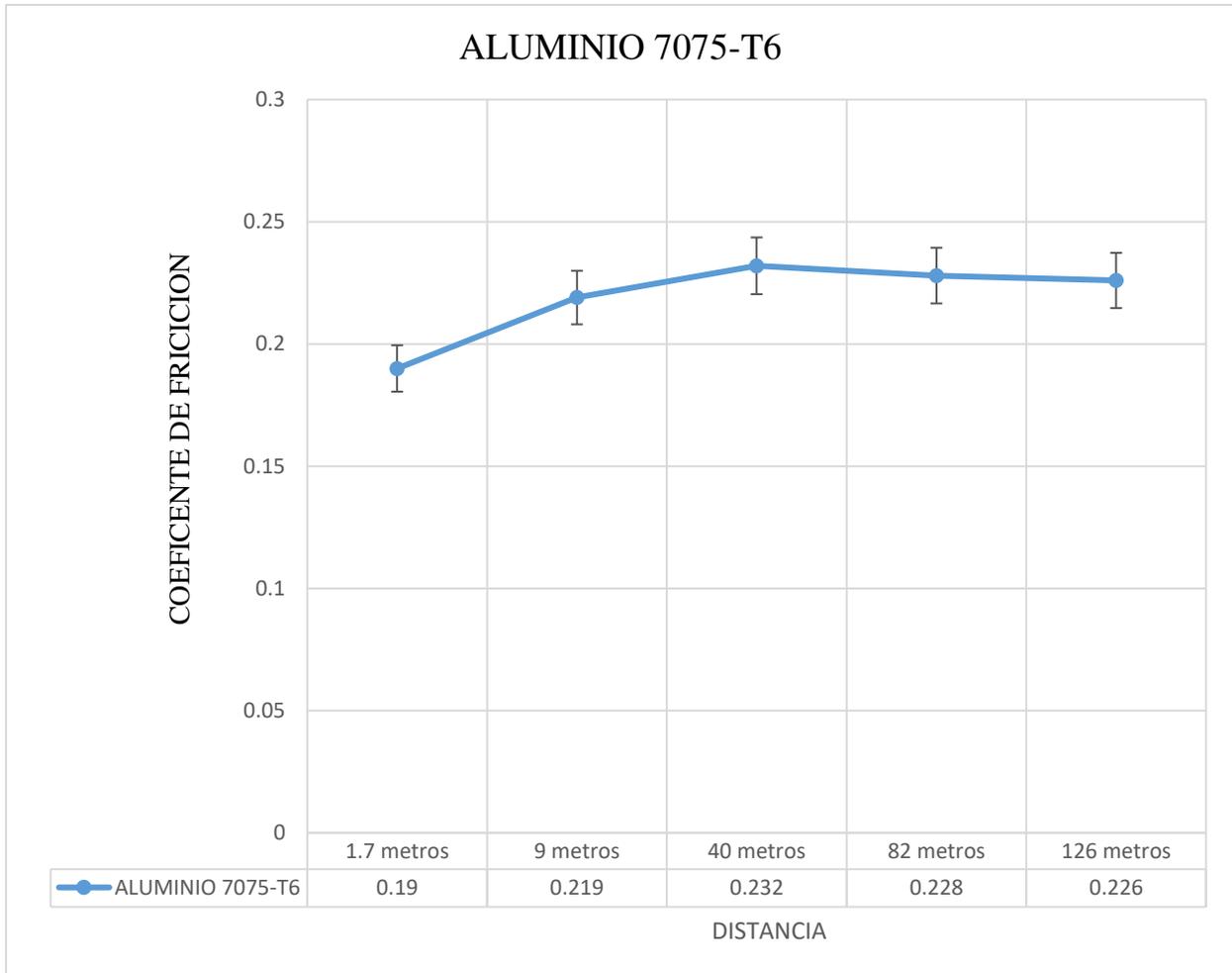


Figura 47. Grafica de los coeficientes de fricción de las tres muestras de aluminio 7075-T6.

En la figura 46, se observan los coeficientes de fricción de los tres muestreos de la aleación Al(Zn-Mg-Cu), después del paso 1, 2, 3 y 4 de ECAP, y en la figura 47 la de la aleación de aluminio 7075-T6. Se puede observar que los coeficientes de fricción son similares en las gráfica 46 al final de la prueba, esto nos indica que la reproducibilidad de las pruebas de desgaste es significativamente alta, además de que el coeficiente de fricción más bajo se presentó en la aleación de aluminio 7075-T6, mientras que en las muestras deformadas por ECAP y en la aleación Al(Zn-Mg-Cu) de referencia (previo a ECAP) se registraron coeficientes de fricción relativamente más altos, esto debido a la distribución de intermetálicos (figuras 36 a 43). Lo anterior también se puede relacionar con la dureza del material, debió a que a mayor dureza menor coeficiente de fricción [16], y en este estudio la aleación de aluminio 7075-T6 fue la que presentó mayor dureza.

4.7.2 Pérdida de volumen

Durante los ensayos tribológicos se analizaron las pérdidas de volumen provocadas por el desgaste. Los resultados de la pérdida de volumen se muestran a continuación:

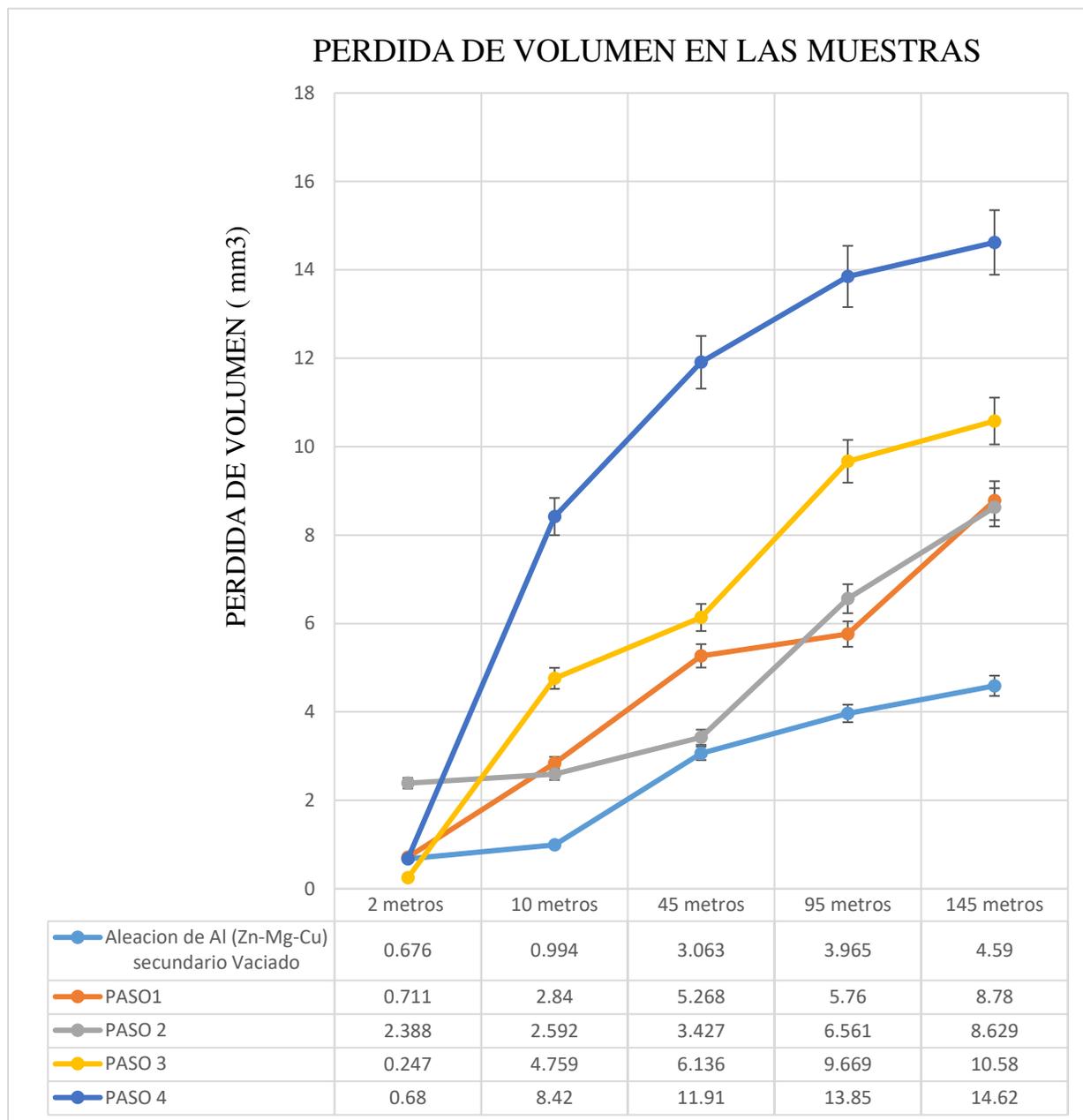


Figura 48. Grafica de las pérdidas de volumen de los tres muestreros de la aleación de Al (Zn-Mg-Cu) secundario vaciado, y los pasos ecap aplicados a dicha aleación.

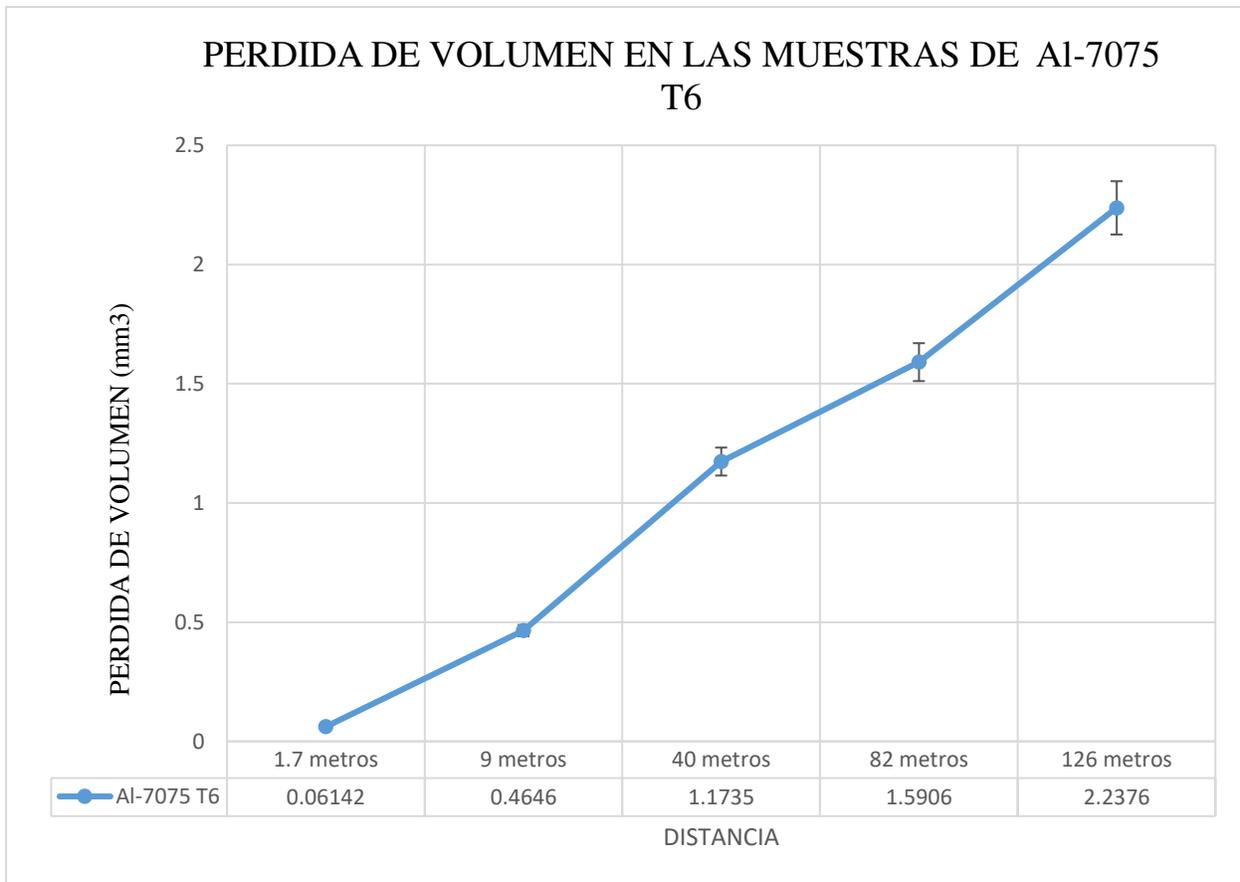


Figura 49. Grafica de la perdida de volumen en las muestras de aluminio 7075-T6

En la figura 48, se puede apreciar la perdida de volumen generada en cada prueba de desgaste, además, se observa que hay una mayor pérdida de volumen en la aleación de Al (Zn-Mg-Cu) procesada por ECAP, esto puede atribuirse a que los intermetalicos se fragmentaron y se generó una re-distribución de precipitados no homogénea con geometrías angulares (figuras 38-41). Por otra parte, en la aleación Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, se observa que la perdida de volumen es menor, por lo antes dicho, las segundas fases en este punto son más gruesas y con una morfología irregular, pero mejor distribuidos que en los pasos ECAP, como se observa en las figuras 36 y 37. Aun así, la aleación de aluminio 7075-T6 tiene una pérdida de volumen aún menor en comparación con la aleación de Al (Zn-Mg-Cu) y después de ser procesada por ECAP, esto puede estar relacionado a la dureza inicial del material, la cual es mayor en comparación con lo antes mencionado, en la aleación con de Al 7075 -T6, las segundas fases son más finas y están mejor distribuidas y con una morfología relativamente más homogénea (figuras 42 y 43), estas características proporcionan una mayor dureza al material (30, 31). En general, se ha encontrado que la distribución y tamaño de las segundas fases tiene un efecto importante en la respuesta al desgaste en materiales, es decir, disminuye el coeficiente de fricción [32]. Por otra parte, en el caso de las aleaciones procesadas por ECAP, hay una serie de resultados que concluyen que la excesiva deformación almacenada causa una disminución en la resistencia al desgaste y se debe a las características del refinamiento

del grano en el procedimiento ECAP y la pérdida inherente de la capacidad de endurecimiento por deformación. [33].

4.7.3 Pérdida de volumen en esferas

Se analizaron los desgastes generados en las esferas del pin on disk durante las pruebas, para estos ensayos se tomó como referencia la norma ASTM G-99. Las siguientes graficas muestran las pérdidas de volumen en cada muestra durante una hora, se hicieron cinco pausas durante cada prueba y se realizaron tres muestreos como se ilustra a continuación:

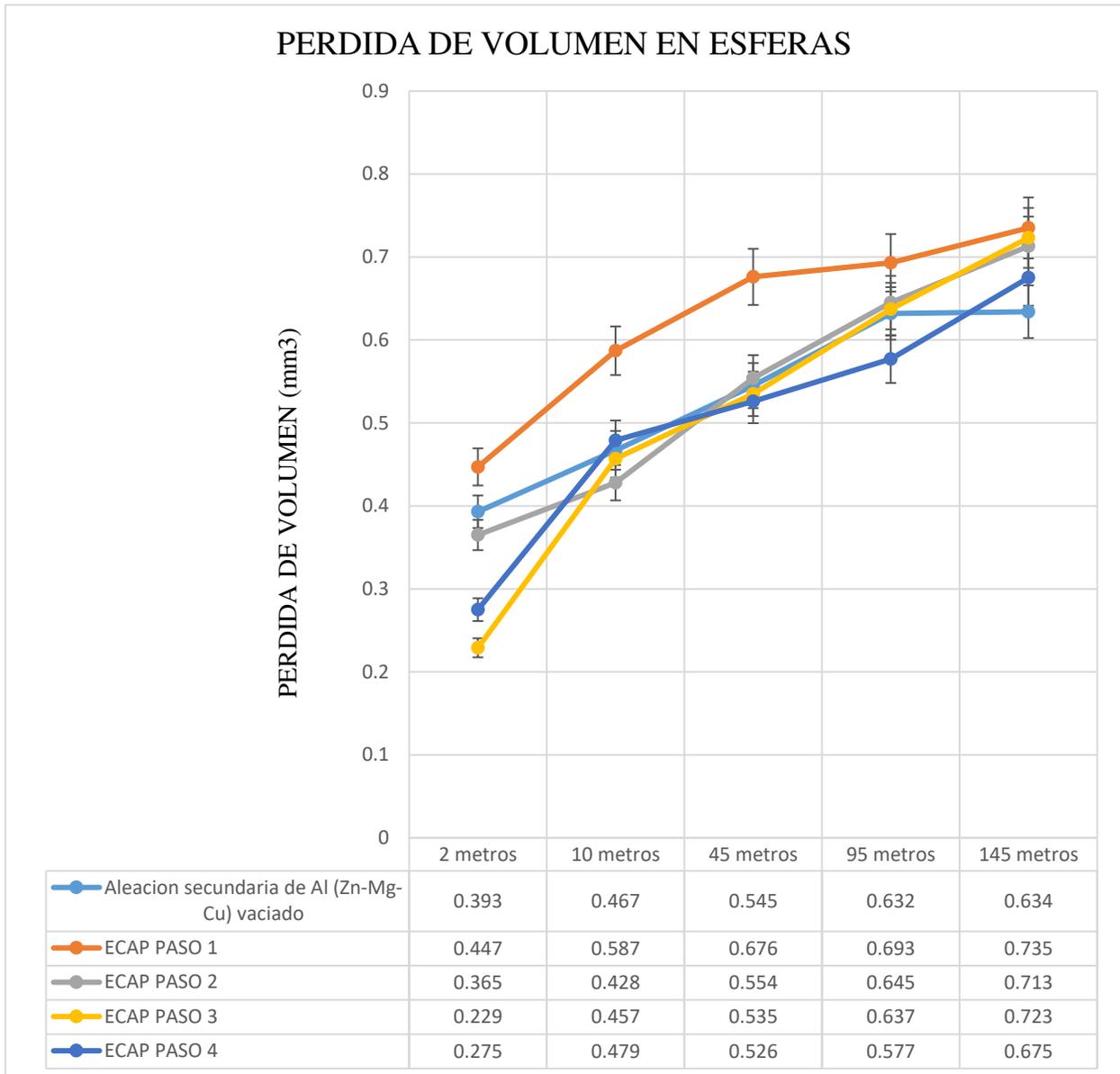


Figura 50. Grafica de las pérdidas de volumen en las esferas en el tercer muestreo.

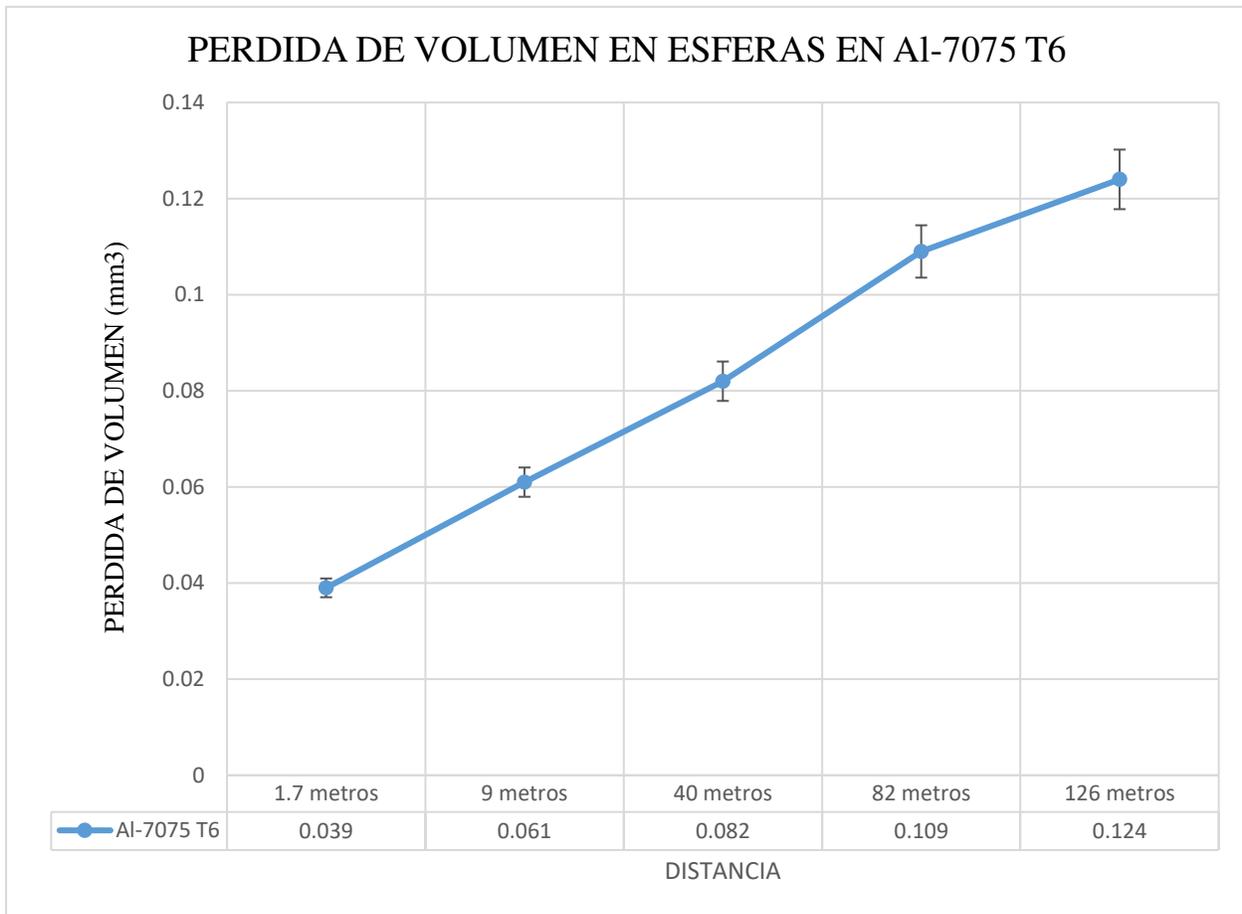


Figura 51. Grafica de las pérdidas de volumen en esferas en aluminio 7075- T6

De la figura 50, se aprecia que hay una cantidad de pérdida de volumen similar entre las esferas para cada condición, sin embargo, se puede apreciar que en la figura 51, en las muestras de aluminio 7075-T6 la cantidad de volumen que se pierde es menor. Lo anterior se relaciona a la dureza de esta aleación en comparación con las procesadas por ECAP, debido a que la dureza tiene un impacto importante en la pérdida de volumen de la muestra, además la adhesión es menor debido a que el Al 7075-T6 es más duro, por lo tanto, la masa adherida y pérdida será menor en esta esfera. El resto de los resultados para el aluminio de referencia (vaciado) y mismo procesado por ECAP presentaron un comportamiento similar, y esto se ve reflejado por las microdurezas en los pasos ECAP aplicados en las muestras, al ser similares, estas complementan la pérdida de volumen, el cual es similar del paso 1 al 4, pero en el aluminio vaciado, se puede apreciar que hay menor pérdida de volumen, y esto se debe a que los intermetalicos son más gruesos y estos a su vez evitan que haya mayor pérdida de volumen en comparación de los pasos ECAP.

4.8 Huellas de desgaste

En general los mecanismos de desgaste se pueden establecer a partir de la información y características de las huellas que se generan durante la prueba, para esto se tomaron imágenes de las huellas de desgaste, y durante cada ensayo se hicieron cinco pausas (1, 5, 20, 40, 60 min) y se

analizaron utilizando un estereoscopio montado en el tribómetro. La escala de referencia usada para todas las imágenes fue de 0.5 mm para tomar mediciones como se observa abajo. A continuación, se muestran las imágenes tomadas de las huellas de desgaste en las muestras en el minuto 1. Como dato, solo se mostraran los tiempos en donde hubo cambios mas relevantes.

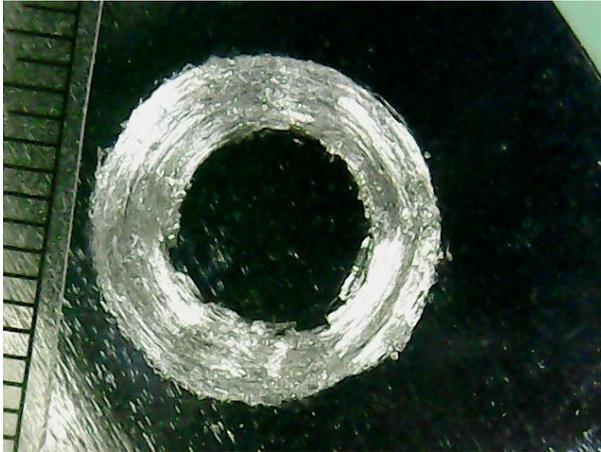


Figura 52. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.



Figura 53. Ecap paso 1



Figura 54. Ecap paso 2



Figura 55. Ecap paso 3

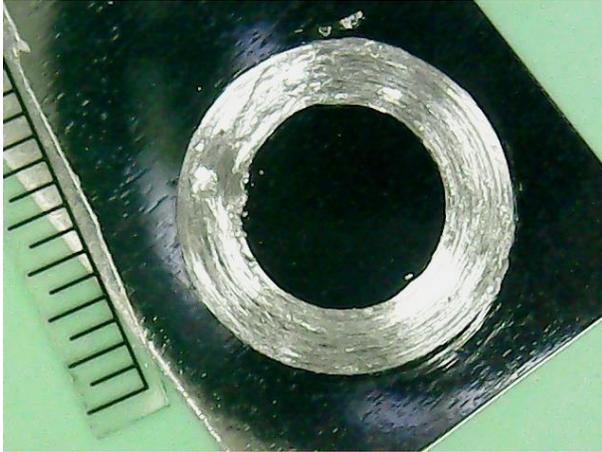


Figura 56. Ecap paso 4



Figura 57. Al 7075- T6

A continuación, se muestran las imágenes tomadas de las huellas de desgaste en las muestras en el minuto 20.

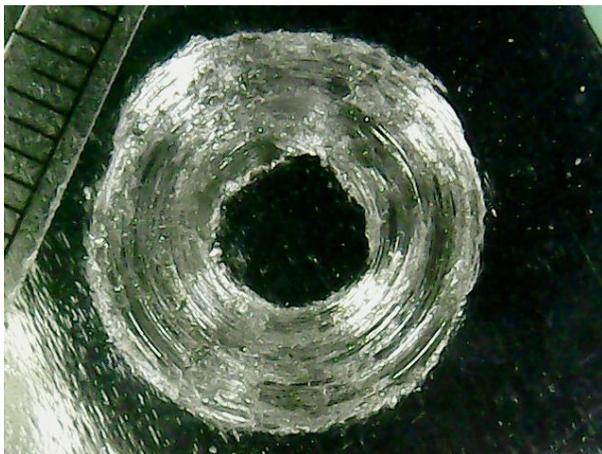


Figura 58. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado



Figura 59. Ecap paso 1

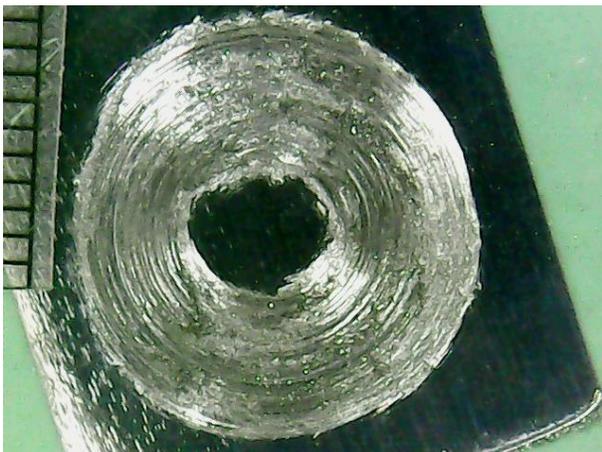


Figura 60. Ecap paso 2

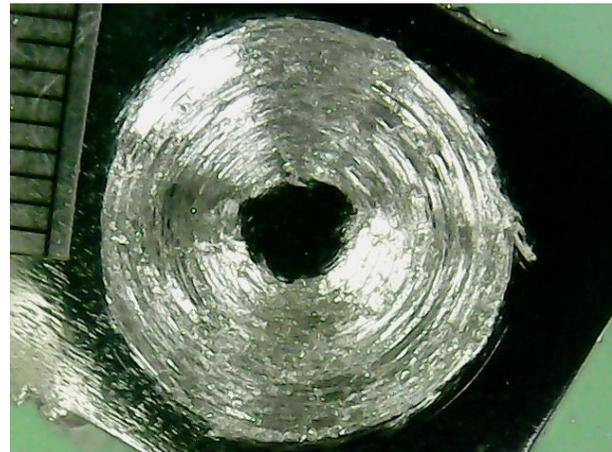


Figura 61. Ecap paso 3

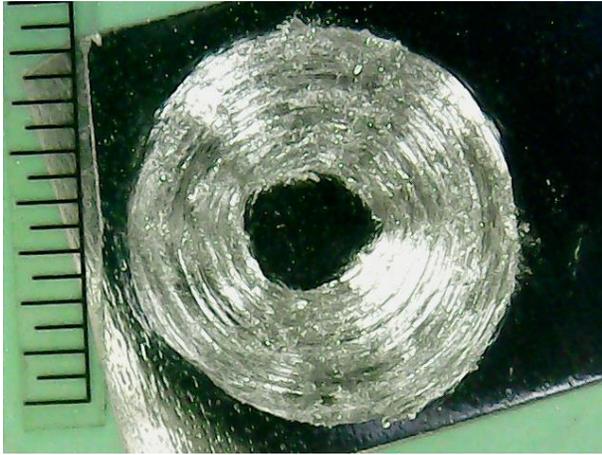


Figura 62. Ecap paso 4

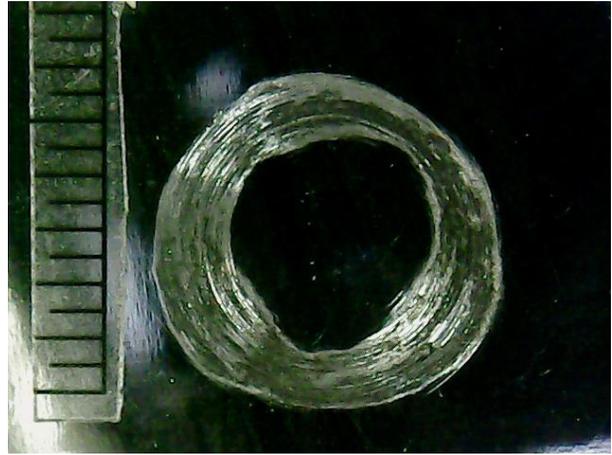


Figura 63. Aleación de aluminio 7075-T6

A continuación, se muestran las imágenes tomadas de las huellas de desgaste en las muestras en el minuto 60.



Figura 64. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado

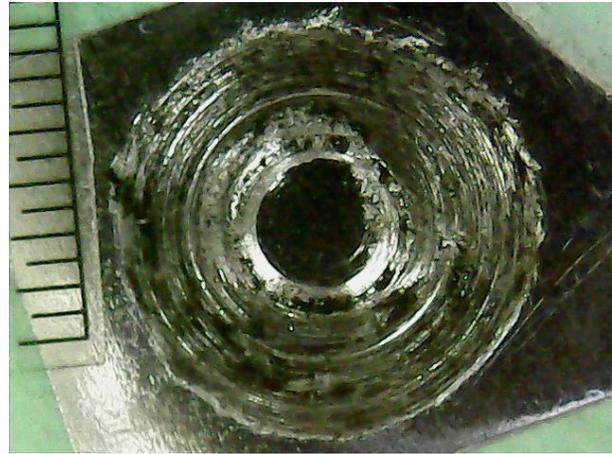


Figura 65. Ecap paso 1



Figura 66. Ecap paso 2

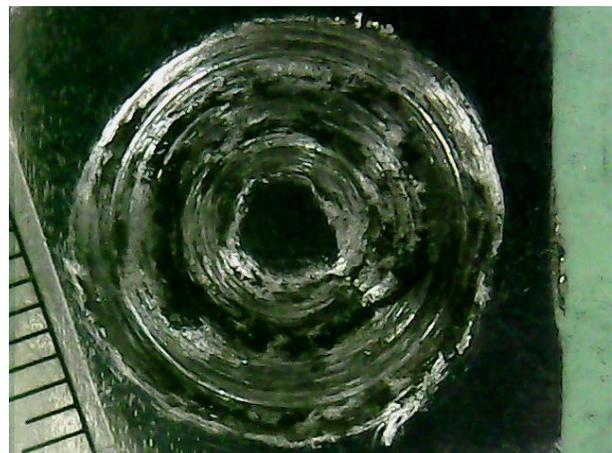


Figura 67. Ecap paso 3

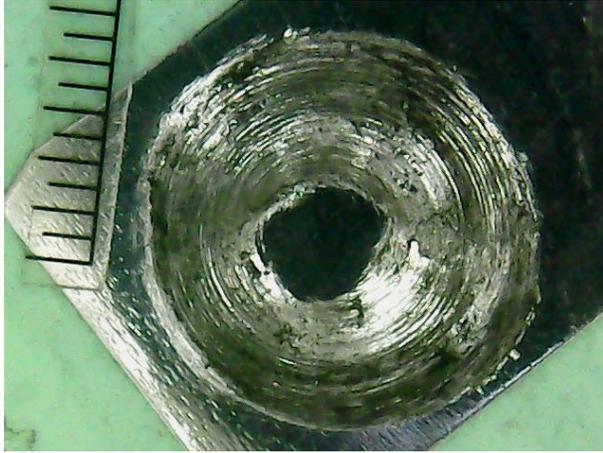


Figura 68. Ecap paso 4



Figura 69. Aleacion de aluminio 7075-T6

En las imágenes anteriores de las huellas de desgaste (figura 52-69), se puede observar claramente un incremento en el tamaño de huella en función del tiempo de la prueba y con esto la distancia recorrida. Los mecanismos de desgaste quedan identificados, en especial entre los minutos 20 y 60, para el minuto 60, los escombros (debris) se vuelven de color negro en comparación de los primeros 20 minutos de la prueba. La zona de desgaste que se observa en las muestras se torna oscuro, y esto es debido al mecanismo de desgaste y a la modificación de la composición en el sistema. De acuerdo con lo anterior, se puede deducir que el desgaste es de tipo adhesivo y delaminación por fatiga durante la prueba, y hay calentamiento durante y al finalizar la prueba debido a la fricción generada por el contacto prolongado entre la esfera y la muestra (ver sección 4.10). [26].

Por otra parte, en el desgaste generado en las muestras procesadas por ECAP, los mecanismos de desgaste fueron similares a los de la aleación de Al (Zn-Mg-Cu), comparando se puede observar que no hay una diferencia considerable en las características de las superficies de desgaste, y al igual que el sistema anterior, los cambios en los mecanismos de desgaste se aprecian a partir del minuto 20, para finalizar un calentamiento, debido por el contacto prologado de las muestras y las esferas.

En la aleación de aluminio 7075 T6, se aprecia que los mecanismos de desgaste generados difieren en comparación al desgaste en las muestras de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado y las procesadas por ECAP. Los mecanismos de desgaste son más de tipo abrasivos que adhesivos en este sistema, como se observa en la sección 4.10.

Se ha encontrado que la resistencia al desgaste incrementa conforme aumenta la deformación introducida a ciertas aleaciones por ECAP (18) (20), pero esto no siempre sucede, y se puede asociar a diversos factores, tales como: la composición del material y las rutas ECAP. Como es el caso de una aleación de Al-Cu, en la cual, si se aumenta el porcentaje de cobre en la aleación, esta obtendrá una mayor resistencia al desgaste después de ser deformada por ECAP [17], en cambio en el caso del Al-1050, la resistencia al desgaste disminuye en muestras procesadas por ECAP y a la falta de una capacidad de endurecimiento por deformación [19].

Para el caso de tratamientos térmicos en aleaciones, como la usada en la aleación de aluminio 7075-T6, se observa un incremento en la resistencia al desgaste y ha sido relacionado a las segundas fases presentes en la aleación [21]. Por lo tanto, debido a la dureza y las segundas fases en la aleación de aluminio 7075-T6 el coeficiente de fricción es menor, y las muestras deformadas por ECAP presentaron un coeficiente de fricción relativamente mayor y constante el cual no cambió con el aumento en la deformación de las muestras.

A continuación, se presenta evidencia de las características superficiales en el “punto” de contacto de la esfera, en estas imágenes se aprecia principalmente la adhesión de aluminio en la superficie de la esfera de acero. La presencia de aluminio sugiere que en diversas etapas del ensayo se tiene un contacto Aluminio-Aluminio.

4.9 Desgaste y mecanismos de desgaste en esferas.

La escala de referencia usada para todas las imágenes fue de 0.5 mm a la misma magnificación para tomar mediciones, como se observa abajo. A continuación, se muestran las imágenes tomadas de las huellas de desgaste en las esferas en el minuto 1.

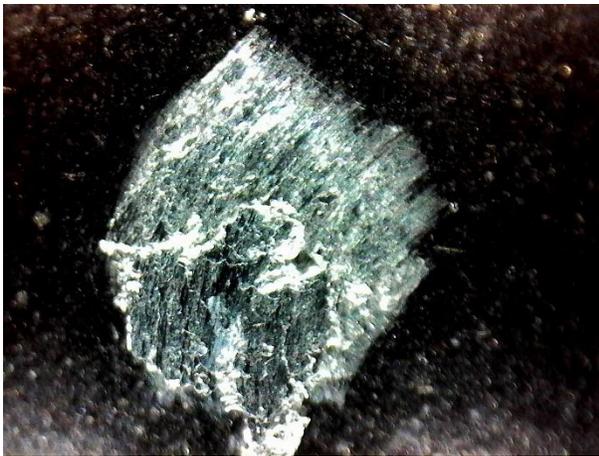


Figura 70. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado

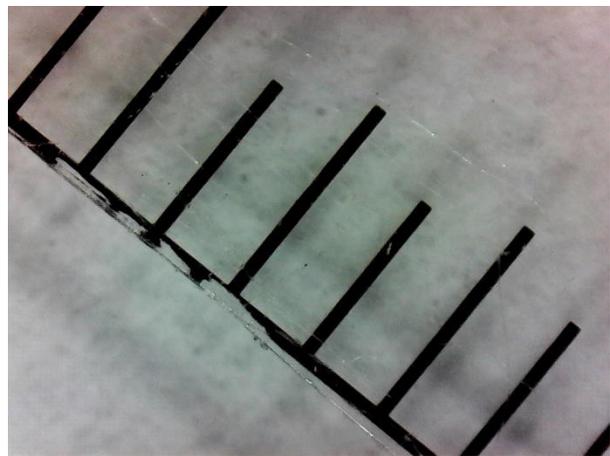


Figura 71. Escala para medición de figura 70

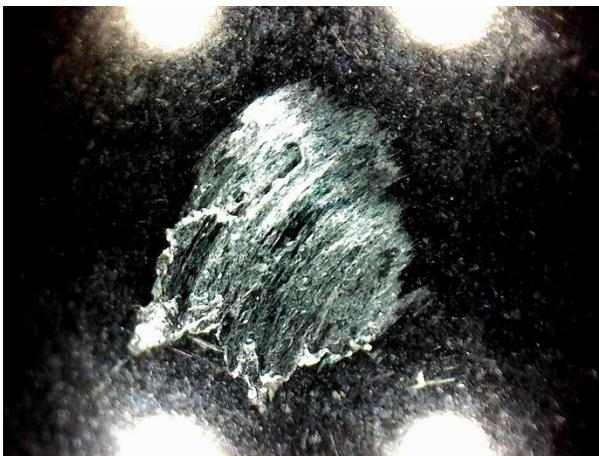


Figura 72. Ecap paso 1

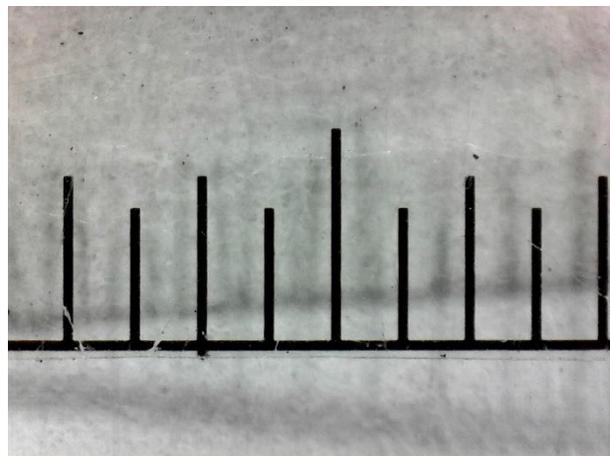


Figura 73. Escala para medición de figura 72



Figura 74. Ecap paso 2

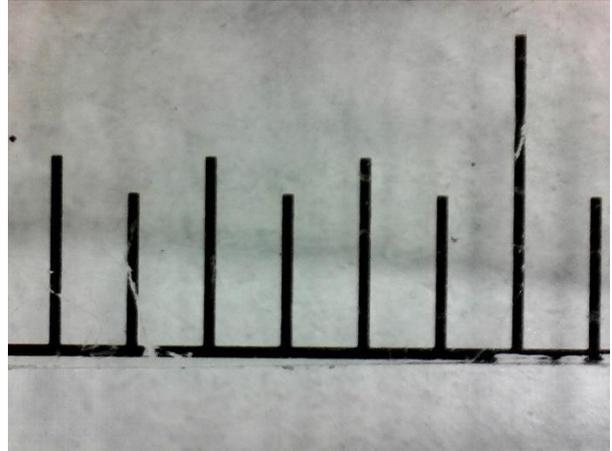


Figura 75. Escala para medición de figura 74



Figura 76. Ecap paso 3

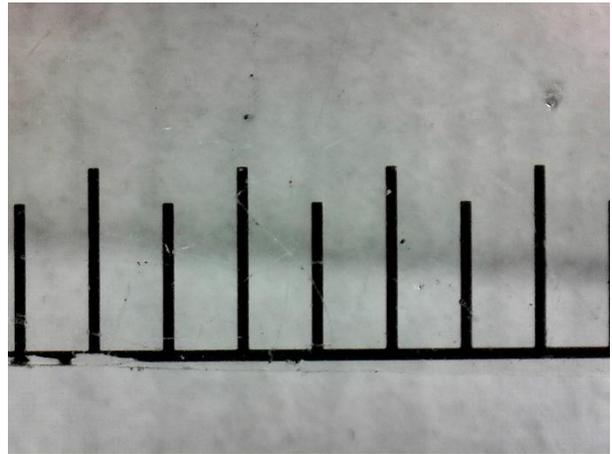


Figura 77. Escala para medición de figura 76



Figura 78. Ecap paso 4

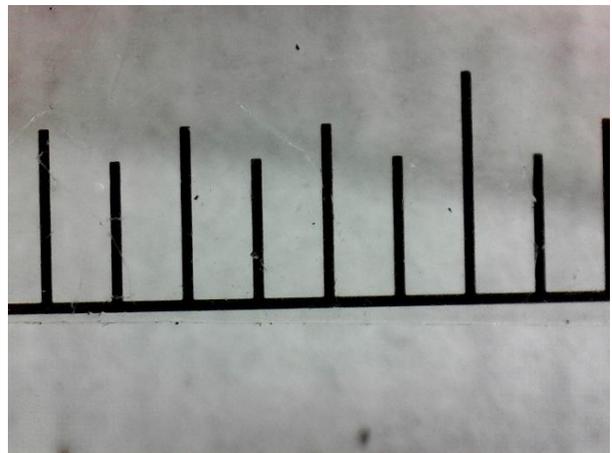


Figura 79. Escala para medición de figura 78



Figura 80. Aleación de aluminio 7075-T6

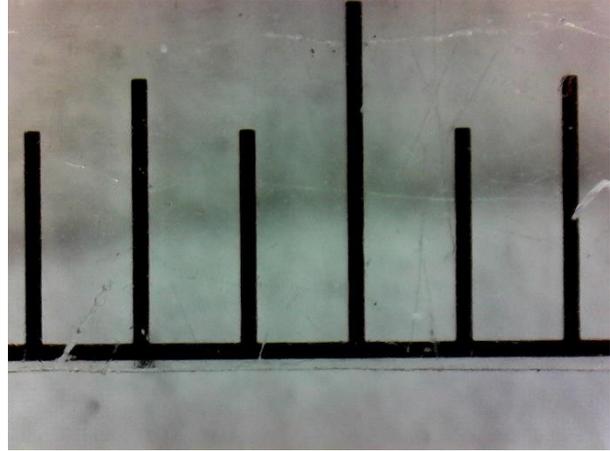


Figura 81. Escala para medición de figura 80

A continuación, se muestran las imágenes tomadas de las huellas de desgaste en las esferas en el minuto 20.

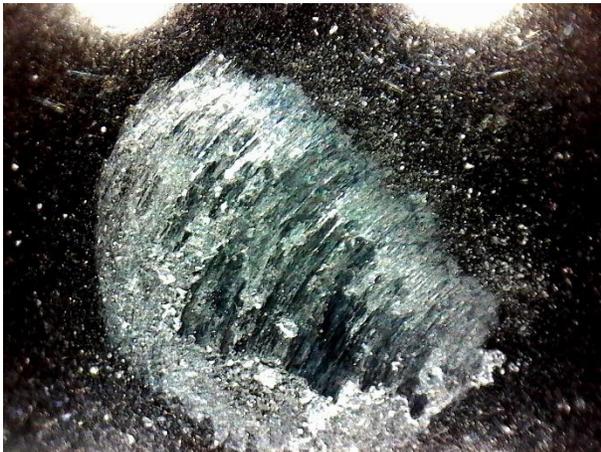


Figura 82. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado

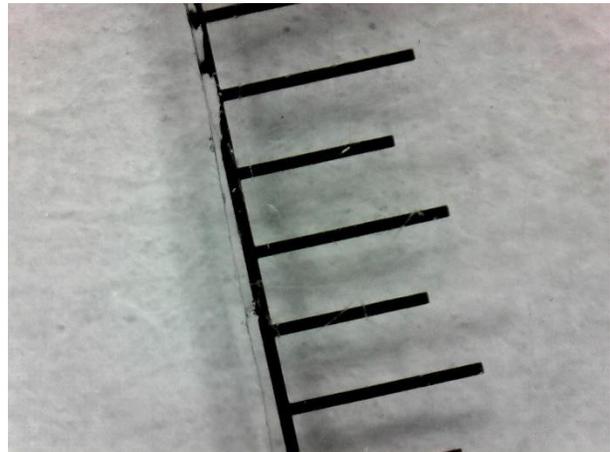


Figura 83. Escala para medición de figura 82

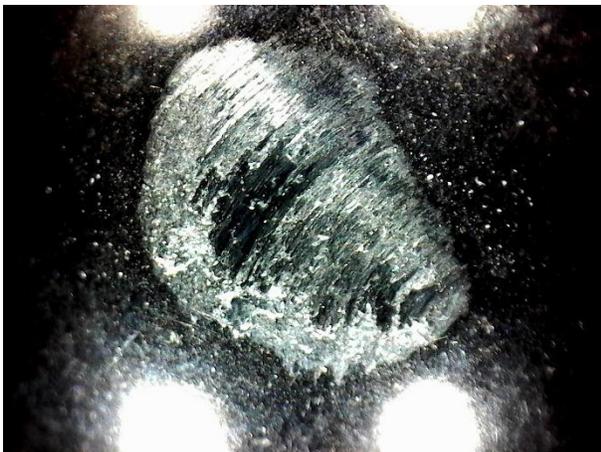


Figura 84. Ecap paso 1

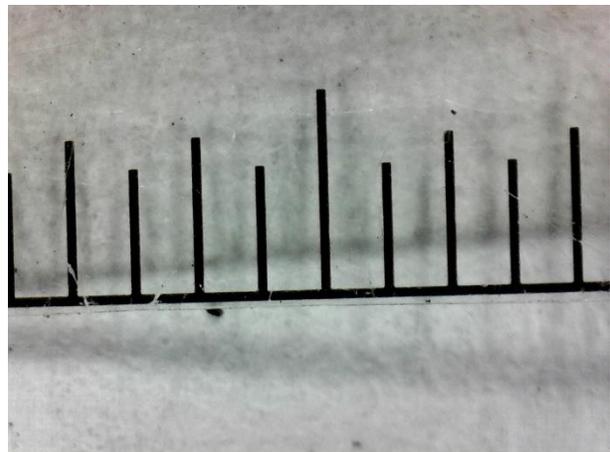


Figura 85. Escala para medición de figura 84

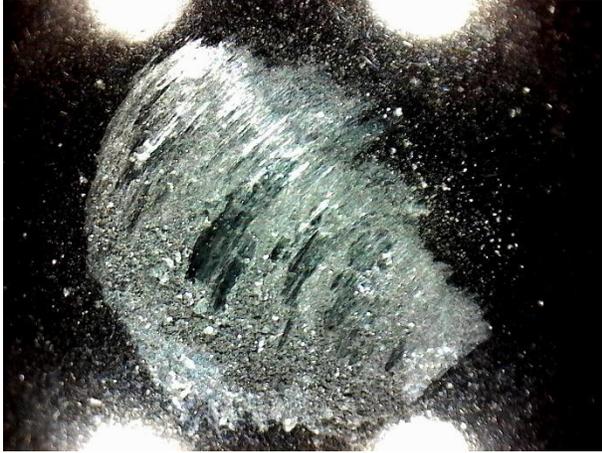


Figura 86. Ecap paso 2

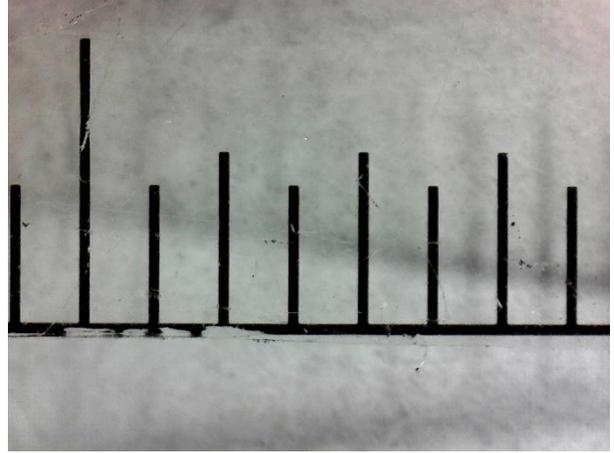


Figura 87. Escala para medición de figura 86

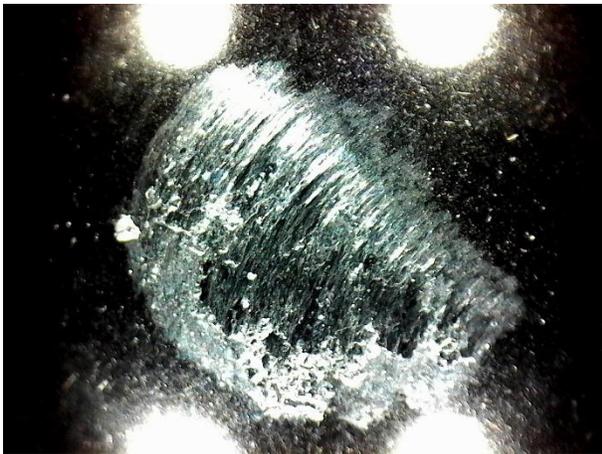


Figura 88. Ecap paso 3

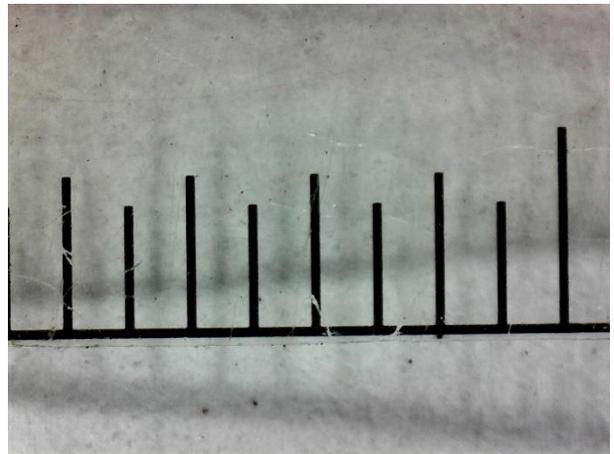


Figura 89. Escala para medición de figura 88



Figura 90. Ecap paso 4

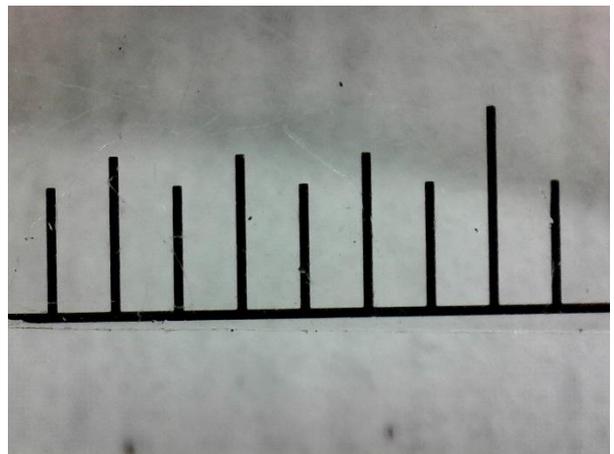


Figura 91. Escala para medición de figura 90



Figura 92. Aleación de aluminio 7075- T6

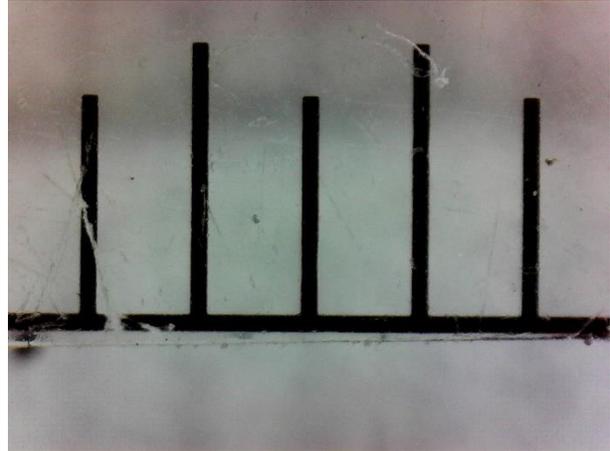


Figura 93. Escala para medición de figura 92

A continuación, se muestran las imágenes tomadas de las huellas de desgaste en las esferas en el minuto 60.



Figura 94. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado

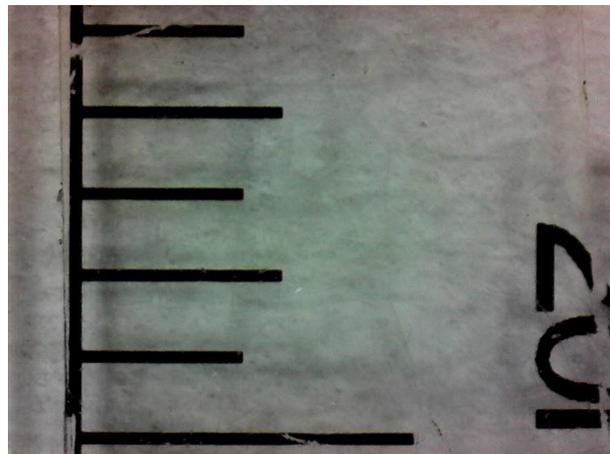


Figura 95. Escala para medición de figura 94.

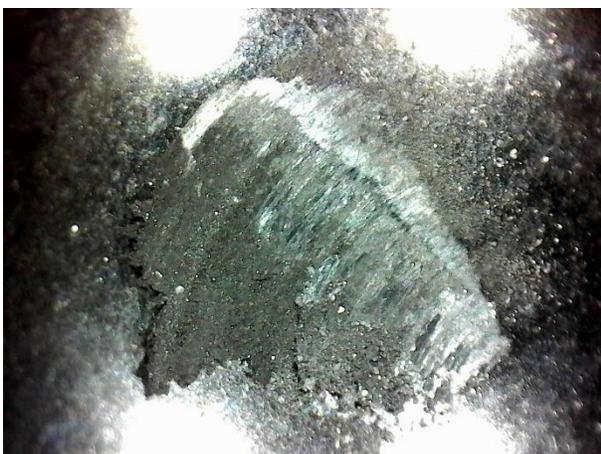


Figura 96. Ecap paso 1

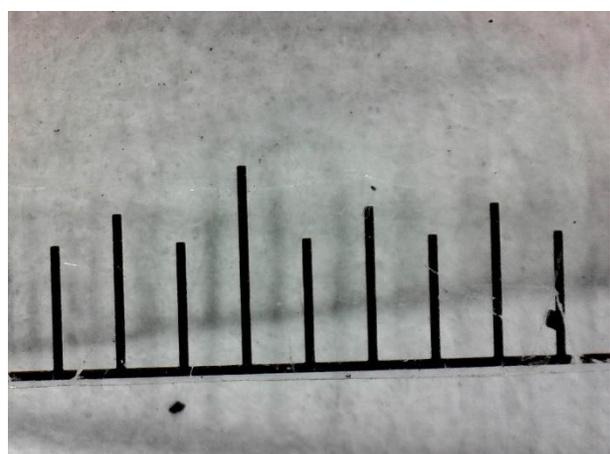


Figura 97. Escala para medición de figura 96



Figura 98. Ecap paso 2

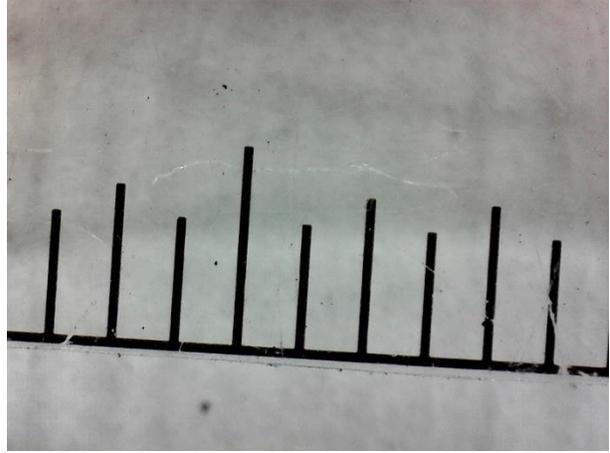


Figura 99. Escala para medición de figura 98.

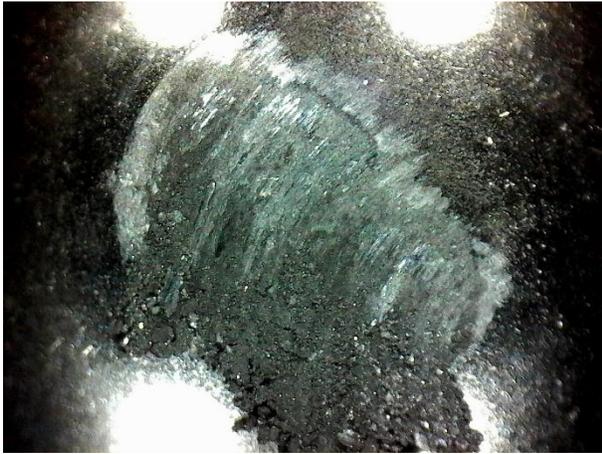


Figura 100. Ecap paso 3

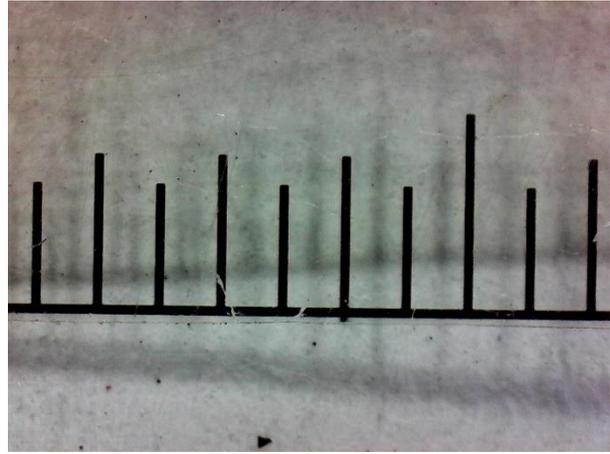


Figura 101. Escala para medición de figura 100.



Figura 102. Ecap paso 4

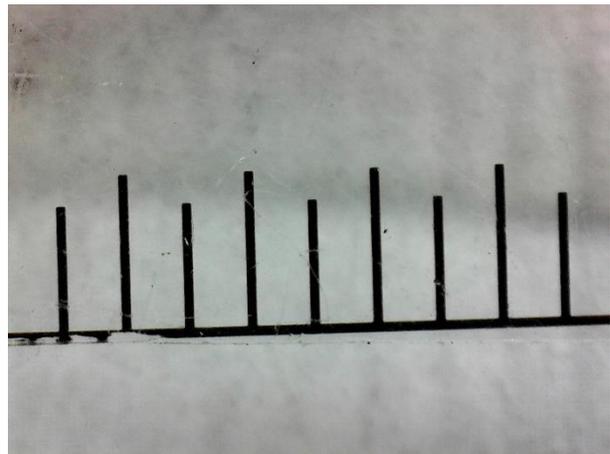


Figura 103. Escala para medición de figura 102.



Figura 104. Aleación de aluminio 7075-T6

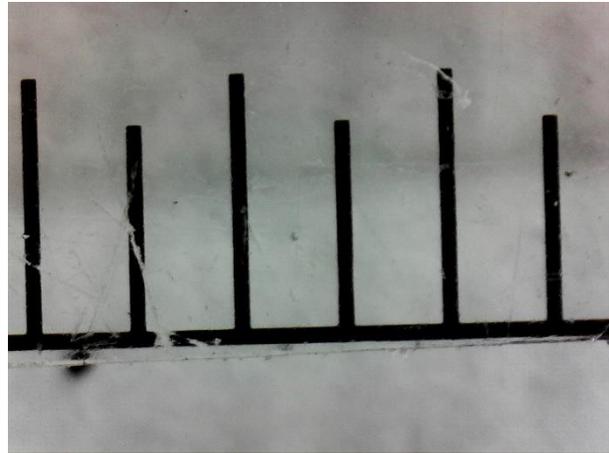


Figura 105. Escala para medición de figura 104.

En las figuras anteriores, se observan las características de las superficies de contacto y el desgaste en las esferas usadas durante las pruebas tribológicas. En todas las imágenes se aprecia un desgaste adhesivo, y esto se debe por un lado a bque el aluminio es más suave que el acero inoxidable de las esferas, y se sabe que el aluminio se adhiere al hierro [16]. La adhesión fue relativamente menor en las esferas donde hicieron contacto con la aleación de aluminio 7075-T6, y el desgaste disminuye al aumentar la dureza [17], por lo tanto, la adhesión disminuyó. En el resto de las pruebas de la aleación Al (Zn-Mg-Cu) vaciado y procesadas por ECAP, la adhesión es más evidente, debido a que el aluminio en estas pruebas resulto ser más suave o tener menor dureza, como se observa en la figura 44. En algunas imágenes tomadas en los últimos 20 min como por ejemplo la figura 98, se observa un resquebrajamiento del aluminio adherido debido al calor generado por la fricción, el cual hace que el metal se vuelva frágil [28].

4.10 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Como parte del análisis de desgaste, al final de las pruebas se analizaron las superficies mediante MEB [27]. A continuación, se muestran los resultados de este análisis, las imágenes se obtuvieron mediante electrones secundarios con el objetivo de visualizar el relieve en las zonas de desgaste.

Análisis de huella de desgaste en aleación secundaria Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, por medio de microscopia electrónica de barrido.

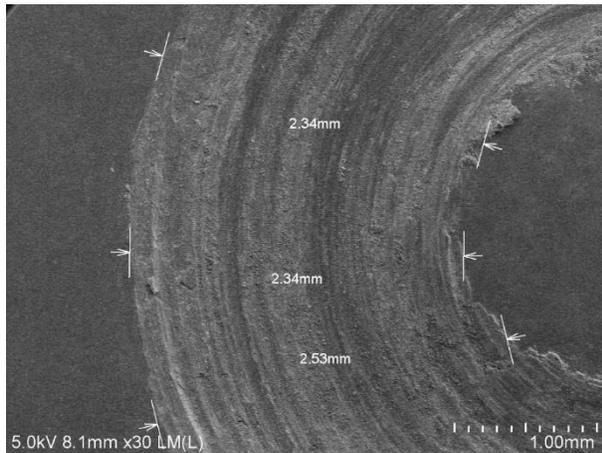


Figura 106. Imagen capturada con MEB a x30.

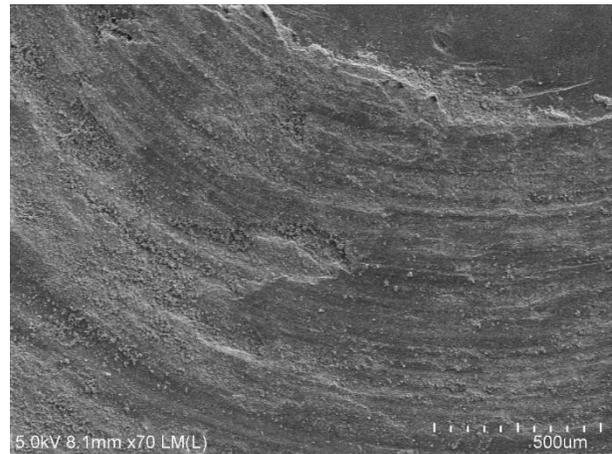


Figura 107. Imagen capturada con MEB a x70

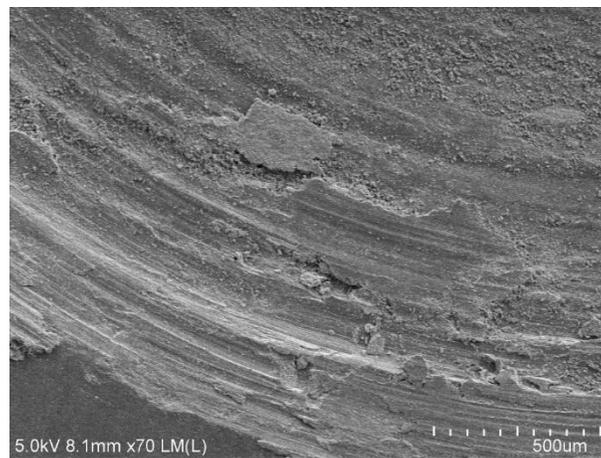


Figura 108. Imagen capturada con MEB a x70.

Análisis de huella de desgaste en muestras ECAP paso 1, por medio de microscopía electrónica de barrido.

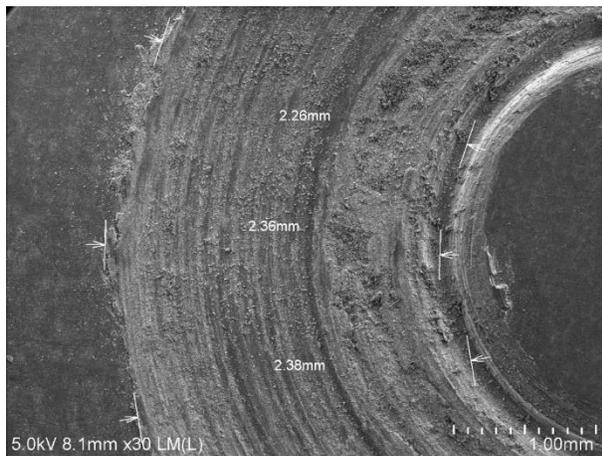


Figura 109. Imagen capturada con MEB a x30.

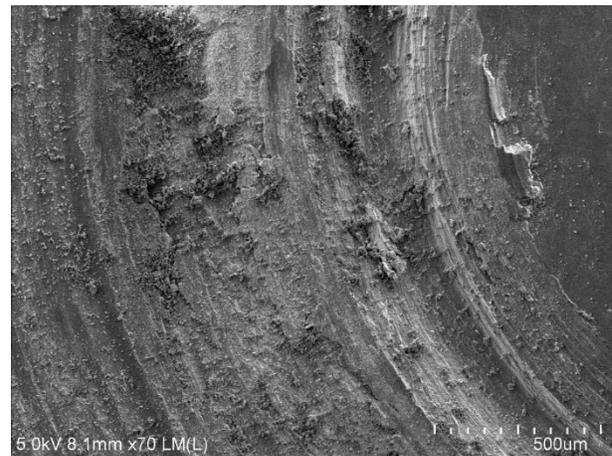


Figura 110. Imagen capturada con MEB a x70.



Figura 111. Imagen capturada con MEB a x70.

Análisis de huella de desgaste en muestras ECAP paso 2, por medio de microscopía electrónica de barrido.

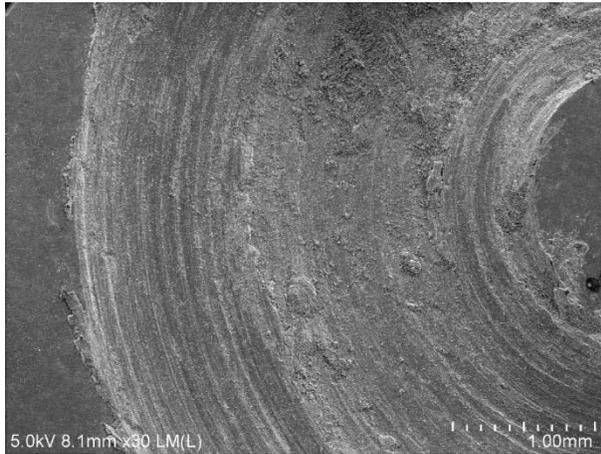


Figura 112. Imagen capturada con MEB a x30.

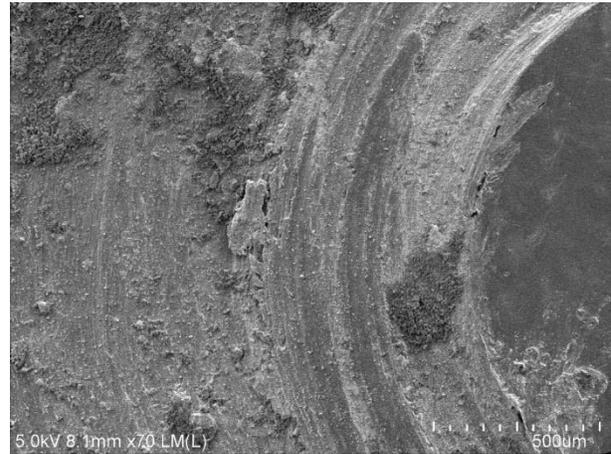


Figura 113. Imagen capturada con MEB a x70.

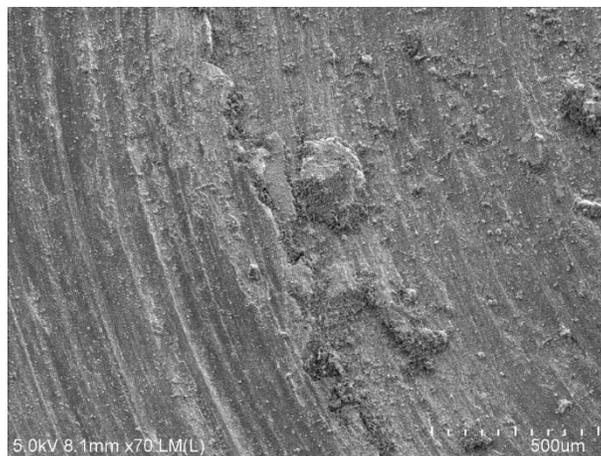


Figura 114. Imagen capturada con MEB a x70.

Análisis de huella de desgaste en muestras ECAP paso 3, por medio de microscopia electrónica de barrido

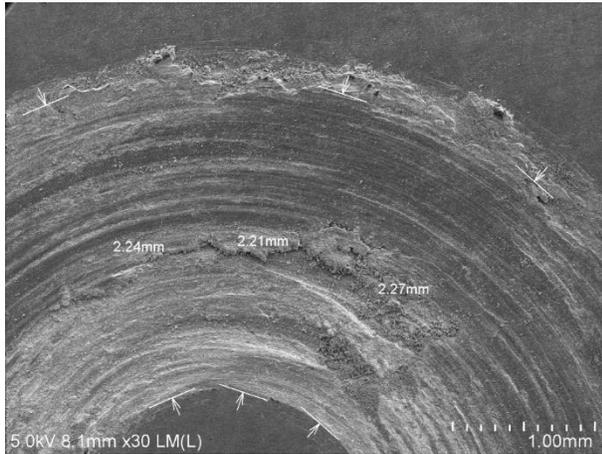


Figura 115. Imagen capturada con MEB a x30.

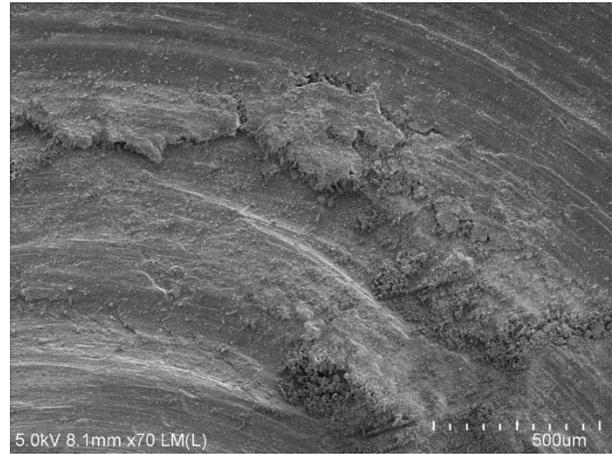


Figura 116. Imagen capturada con MEB a x70.



Figura 117. Imagen capturada con MEB a x70

Análisis de huella de desgaste en muestras ECAP paso 4, por medio de microscopia electrónica de barrido.

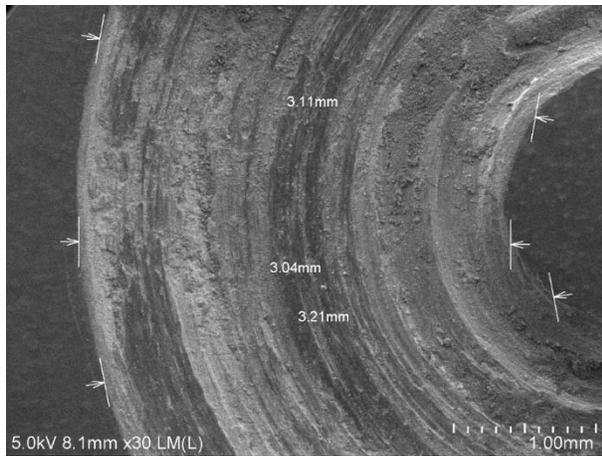


Figura 118. Imagen capturada con MEB a x30.



Figura 119. Imagen capturada con MEB a x70.



Figura 120. Imagen capturada con MEB a x70.

Análisis de huella de desgaste en muestras Al-7075 T6, por medio de microscopia electrónica de barrido.

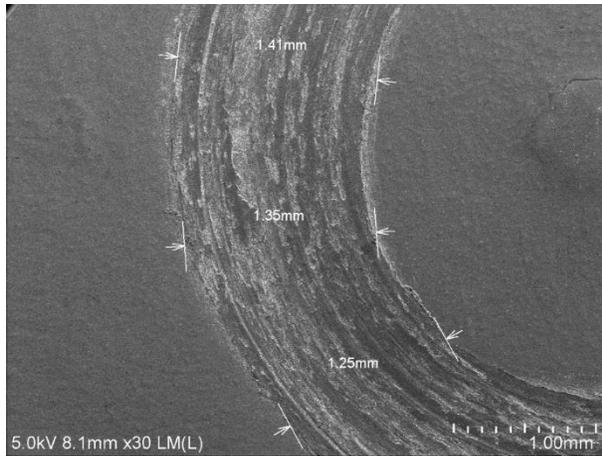


Figura 121. Imagen capturada con MEB a x70.

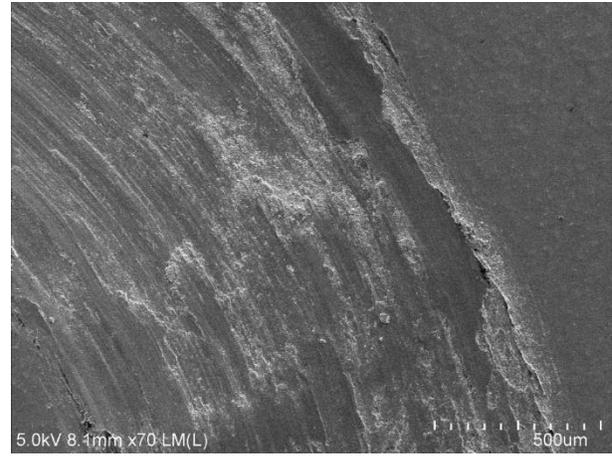


Figura 122. Imagen capturada con MEB a x70.

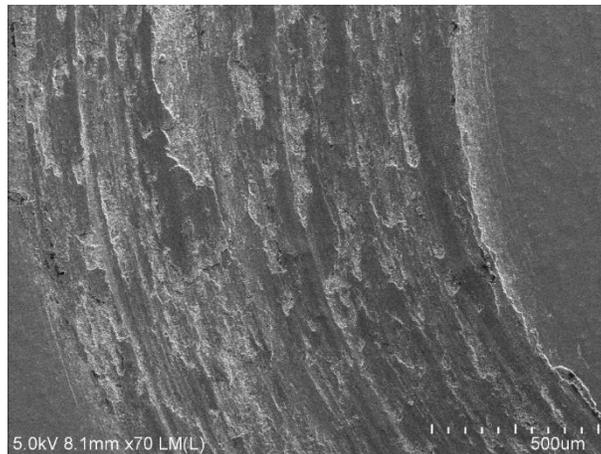


Figura 123. Imagen capturada con MEB a x70.

De la figura 106 a 108, se puede observar que los mecanismos presentes en la aleación secundaria de aluminio Al (Zn-Mg-Cu) vaciado de referencia previo al ECAP son la delaminación por fatiga, y como se apreció en las secciones 4.8 y 4.9, también hubo presencia de desgaste adhesivo [17], en el caso de la delaminación se puede observar con facilidad, debido a que son las zonas negras, y a su vez también, en las figuras 109 a 120, los cuales son los pasos ECAP 1, 2, 3, 4, aparecen los mismos tipos de mecanismos de desgaste. Al final donde se presentó un desgaste abrasivo acompañado de delaminación fue en la aleación de aluminio 7075 T6, como se observa en las figuras 121 a 123, y esto se debe a que tiene mayor dureza y por lo tanto el desgaste abrasivo en el material se hizo presente más fácilmente que en la aleación secundaria Al (Zn-Mg-Cu) vaciado antes y después de la deformación plástica severa [16]. En resumen, se observaron mecanismos de adhesión en algunas zonas y un mecanismo de fatiga por delaminación debido a la interacción entre la esfera y la superficie del material [34].

Adicionalmente se presenta en cada condición de análisis, información acerca del espesor de la huella de desgaste, se utilizaron valores promedio de las diferentes mediciones, esta información fue utilizada y comparada para el análisis de la pérdida de volumen que se realizó.

CAPITULO 5

DISCUSION

5.1 Deformación plástica severa

El material solamente se procesó hasta un cuarto paso en ECAP, debido a que se comenzaron a formar grietas en los extremos de las probetas, esto debido a los esfuerzos de tensión que hay entre el canal del dado ECAP y la superficie de la probeta.

Con los parámetros de procesamiento seleccionados, se logró principalmente la fragmentación y la redistribución de las segundas fases, a su vez, se observó un incremento moderado en la dureza,

Evidentemente para lograr obtener un tamaño de grano ultrafino en esta aleación es necesario realizar una combinación de un mayor número de pases de ECAP y ciclos térmicos que permitan lograr un balance entre endurecimiento y reducción de tamaño de grano evitando al máximo el agrietamiento.

5.2 Microdureza

Primeramente, se realizaron pruebas de microdureza y la finalidad de esto fue el obtener la dureza del material una vez deformado. Por lo que se observa en las gráficas del capítulo 4, hay un incremento apreciable en la dureza del material conforme aumenta el número de pasos en ECAP, y esto se debe a que se acumula la deformación y el tamaño de grano es más pequeño. A su vez también, se realizaron pruebas en la aleación de aluminio 7075 T6, y se observó que la dureza fue más grande en comparación del cuarto paso ECAP realizado en la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, y esto puede ser debido a la presencia de precipitados.

5.3 Microscopia óptica

Mediante microscopia óptica fue posible observar los tamaños de grano obtenidos en los diferentes pasos ecap. De aquí fue posible concluir que el tamaño de grano fue disminuyendo conforme se aplicaban más paso ecap, pero también se observó que los intermetalicos que en un principio eran grandes, se fueron fragmentando y volviéndose más finos. En la aleación de aluminio 7075 T6 hay una mejor distribución de precipitados y la microestructura es más uniforme.

5.4 Microscopia electrónica de barrido

Con microscopia electrónica de barrido y mediante los espectros de EDS, se obtuvieron las composiciones de los intermetalicos presentes en la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, las cuales fueron $Al_6(Fe,Mn)$ y $Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$. Esta última debido a que la aleación tiene un contenido de silicio de 0.292% y hierro de 0.56%, cantidades suficientes para que en conjunto con el manganeso se pueda formar dichas fases.

5.5 Pruebas de desgaste

En las pruebas de desgaste realizadas en la aleación de aluminio secundario (Zn-Mg-Cu) vaciado y sus respectivas piezas deformadas por medio de ecap, se observa que los coeficientes de fricción no cambian tanto y esto puede ser debido a que en las piezas deformadas aunque los granos son más pequeños, los intermetalicos se vuelven más finos, y en el vaciado los intermetalicos son más gruesos pero con un tamaño de grano más grande, así, si se compara, se observa que el coeficiente es menor en la aleación de aluminio 7075 T6, y esto puede deberse debido a la presencia de precipitados y de una microestructura más uniforme.

Mediante microscopia óptica, seguido de microscopia electrónica de barrido y utilizando los electrones secundarios, se pudieron observar los tipos de desgaste, así como la cantidad de volumen que se perdió. El tipo de desgaste presente con excepción de la aleación de aluminio 7075 T6, fue desgaste adhesivo y delaminacion, y se sabe que hay adhesión debido al análisis que se realizó en las esferas. Mientras que en la aleación de aluminio 7075 T6 se observó un desgaste abrasivo con delaminacion, y esto se puede comprobar con la microdureza obtenida de este material, la cual fue más alta que la aleación secundaria.

El desgaste fue más severo en el paso cuatro ECAP, y fue menor en la aleación de aluminio 7075 T6, este último posiblemente debido a los precipitados y al tipo de microestructura más uniforme. Y como el desgaste es menor, la distancia que se recorrió también es menor.

Durante las pruebas se observaron mecanismos de adhesión en algunas zonas y un mecanismo de fatiga por delaminación debido a la interacción entre la esfera y la superficie del material, la adhesión se observó en las esferas, dado que estas al estar hechas de acero inoxidable, se adhirió aluminio que es más suave. Todas las muestras (excepto el Al 7075-T6), tanto en los pasos ECAP, como en el aluminio vaciado, tienen algunas similitudes en los valores obtenidos durante las pruebas, pero las diferencias que se presentan se deben a los intermetalicos gruesos en el aluminio vaciado, y a las pruebas en seco, lo que provocó una posible recristalización, de ahí por qué hay variación en la perdida de volumen en las muestras.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este proyecto, se comprueba que con los parámetros de procesamiento utilizados la deformación plástica severa llevada a cabo en la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) genera un incremento en la dureza del material, pero no fue superior a la dureza de la aleación de aluminio 7075 T6, lo cual es malo, dado que se esperaba un aumento mayor.

Los resultados en las pruebas de desgaste antes y después de ECAP favorecieron ligeramente a la aleación de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado (previo al ECAP), debido a los intermetalicos gruesos y grandes. Los tipos de desgates que se presentaron fueron la delaminacion por fatiga, adhesivo que se observó en las esferas y abrasivo, este último en las muestras de Al-7075 T6, quien obtuvo mejores resultados en las pruebas tribológicas.

Los intermetalicos se fueron fragmentando poco a poco y volviéndose más finos conforme se aplicaban más pasos ECAP a las probetas de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado. Esto fue un factor determinante en la microdureza y en el desgaste, este último fue similar en las piezas procesadas por ECAP,

6.2. Recomendaciones.

- Se sugiere usar una velocidad baja al momento de realizar la deformación plástica severa por medio de ECAP.
- Se recomienda obtener la microdureza de los intermetalicos, para determinar que tanto influyen estos en el desgaste.
- Se sugiere realizar un tratamiento térmico T6 a la aleación secundaria de aluminio (Zn-Mg-Cu) para hacer una comparación directa con la aleación de aluminio 7075 T6

REFERENCIAS

1. ASM Metals Handbook Vol 02 *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International. 1990.
2. Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. *Ciencia e Ingeniería de Materiales Sexta Edición*. Cengage Learning. 2011
3. Avner, S. H. *Introducción a la Metalurgia Física Segunda Edición*. Mc Graw-Hill. 1988
4. Russell, A. M., & Lee, K. L. *Structure-Property Relations in Nonferrous Metals*. John Wiley & Sons. 2005
5. Gubicza, J., Schiller, I., Chinh, N. Q., Illy, J., Horita, Z., & G., L. T. The effect of severe plastic deformation on precipitation in supersaturated Al-Zn-Mg alloys. *Materials Science and Engineering*, 77-85. 2007
6. Valiev, R. Z., & Langdon, T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, 51, 881-981. 2006
7. Salehi, M., M.H, S., Seyydein, S., Abutalebi, M., & Park, J. Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment. *Materials and Desing*, 57, 250-257. 2014
8. Shaeri, M., Salehi, M., S.H, S., Abutalebi, M., & Park, J. Characterization of microstructure and deformation texture during equal. *Journal of Alloys and Compounds*, 576, 350-357. 2013
9. Shaarbaaf, M., & Reza Toroghinejad, M. Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process. 473, 28-33. 2008
10. Langdon, T. G. The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing. 462(1-2), 3-11. 2007
11. Zhilyaev, A. P., & Langdon, T. G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. 53(March), 893-979. 2008
12. Bharat, B. *Introduction to Tribology Second Edition*. Columbus: John Wiley & Sons. 2013
13. Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. *Engineering Tribology Fourth Edition*. Perth: Butterworth-Heinemann. 2014
14. Menezes, P. L., Ingole, S. P., Nosonovsky, M., Kailas, S. V., & R., L. M. *Tribology for Scientists*. New York: Springer. 2013
15. Bulk nanostructured materials from severe deformation, B. n. Valiev, R Z; Islamgaliev, R K; Alexandrov, I V. 45, 103-189. 2000
16. Gao, N., Wang, C. T., Wood, R. J., & Langdon, T. G. Tribological properties of ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation. *Journal of Materials Science*, 47(12), 4779-4797. 2012

17. Abd El Aal, M. I., El Mahallawy, N., Shehata, F. A., Abd El Hameed, M., & Yoon Yoo, E. Tensile properties and fracture characteristics of ECAP processed Al and Al-Cu alloys. *Metals and Materials International.*, 16(5), 709-716. 2010
18. Gao, L., & Cheng, X. Microstructure and dry sliding wear behavior of Cu-10% Al-4% Fe alloy produced by equal channel angular extrusion. *Wear*, 265(7-8), 986-991. 2008
19. Wang Ting, C., Gao, N., Wood, R. J., & Langdon, T. G. Journal of Materials Science. 46(1), 123-130. 2011
20. Gao, N., Wang Ting, C., Wood J.K, R., & Langdon, T. G. Tribological properties of ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation. 47(12), 4779-4797. 2012
21. Rao, R. N., Das, S., Mondal, D. P., & Dixit, G. Tribology International Effect of heat treatment on the sliding wear behaviour of aluminium alloy (Al – Zn – Mg) hard particle composite. *Tribology International*, 43(1-2), 330-339. 2010
22. Tsuji, N., Saito, Y., Lee, S.-H., & Minamino, Y. New Methods of SPD ARB (Accumulative Roll-Bonding) and Other New Techniques to Produce Bulk Ultrafine Grained Materials. *Nanomaterials*, 5, 480-489. 2004
23. Alhajeri, S. N., Gao, N., & Langdon, T. G. Hardness homogeneity on longitudinal and transverse sections of an aluminum alloy processed by ECAP. *Materials Science and Engineering A*, 528(10-11), 3833-3840. 2011
24. ASM Metals Handbook Vol 09. *Metallography and Microstructures*. ASM International. 1992
25. ASM Metals Handbook Vol 08. *Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International. 2000
26. ASM Metals Handbook Vol 18. *Friction, Lubirication and Wear Technology*. ASM International. 1992
27. ASM Metals Handbook Vol 10. *Materials Characterization*. ASM International. 1986
28. ASM Metals Handbook Vol 15. *Casting*. ASM International. 1988
29. Martinez, N., Kumar, N., Mishra, R. S., & Doherty, K. J. Materials Science & Engineering A E ff ect of tool dimensions and parameters on the microstructure of friction stir welded aluminum 7449 alloy of various thicknesses. *Materials Science & Engineering A*, 684, 470-479. 2017
30. Ausscheidungen, M. D. Correlation between precipitate microstructure and mechanical properties in AA7075-T6 aluminum alloy friction stir welded joints. *Materials Science*, 1-12. 2017

31. Bush, R., Kiyota, M., & Kiyota, C. Characterization of a Friction Stir Weld in Aluminum Alloy 7055 Using Microhardness, Electrical Conductivity, and Differential Scanning Calorimetry (DSC). *Metalurgical and Materials Transactions A*, 47(7), 3522-3532. 2016
32. Gao, L. & X.H, C. Effect of ECAE on Microstructure and Tribological Properties of Cu-10% Al-4% Fe Alloy. *Tribol Lett*, 221-225. 2007
33. Wang Ting, C., Gao, N, Wood, J. K., & Langdon, T. G. Wear behavior of an aluminum alloy processed by equal-channel angular pressing. *J Mater Sci*, 123-130. 2011
34. E. Ortiz-Cuella, M. H.-R.-S. (2011). Evaluation of the tribological properties of an Al-Mg-Si alloy processed by severe plastic deformation. *Wear*, 271, 1828-1832.

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1. Diagrama esquemático del accumulative roll bonding (ARB).....	7
Figura. 2. Ilustración esquemática del procesamiento HPT.....	7
Figura. 3. El principio de procesamiento ECAP, incluyendo la definición de los tres planos ortogonales X, Y y Z.....	8
Figura. 4. El principio de ECAP que muestra el plano de cizallamiento dentro del dado, así como el ángulo abrupto ϕ , y el ángulo de curvatura Ψ	8
Figura. 5. Las cuatro rutas de procesamiento fundamentales en ECAP.....	9
Figura. 6. Los sistemas de deslizamiento vistos en los planos X, Y y Z para pasadas consecutivas usando las rutas de procesamiento A, BA, BC y C.....	10
Figura. 7. Los patrones de corte en los planos X, Y y Z para procesar las rutas A, BA, BC y C al presionar 1, 2, 3 y 4 pasas: los colores rojo, malva, verde y azul corresponden al primero, segundo, tercero y cuarto pase, respectivamente.....	11
Figura. 8. Las distorsiones introducidas en elementos cúbicos cuando se observan en los planos X, Y y Z para procesar las rutas A, BA, BC y C al presionar de 1-8 pasas.....	11
Figura. 9. La microestructura en el plano “Y” después de cuatro pasas en ECAP usando las rutas A, BC y C.....	12
Figura. 10. Ilustración esquemática de los dados utilizados para evaluar la influencia del ángulo del canal, ϕ : los valores de ϕ son (a) 90° , (b) 112.5° , (c) 135° y (d) 157.5°	12
Figura. 11. Superficie de la aleación Al-Si desgastada por el desgaste adhesivo. Observe la formación de partículas de desgaste.....	13
Figura. 12. Micrografía SEM de la superficie del eje de acero inoxidable 303 después del desgaste abrasivo en condiciones no lubricadas. La dirección de deslizamiento es a lo largo del eje vertical.....	14
Figura. 13. Desprendimiento subsuperficial en un cojinete.....	15

Figura 14. Aleacion secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado en un molde.....	16
Figura 15. Probeta obtenida de la aleacion secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.....	16
Figura 16. Imagen de placa de aleación de aluminio 7075 T6, cuyas mediciones son: 75cm x 35cm x 1.5cm.....	17
Figura 17. Imagen de ejemplo de piezas extraídas de placa de aleación de aluminio 7075-T6. Las dimensiones de estas piezas fueron aproximadamente de 1.5 cm x 1.2 cm x 1.7 cm.....	17
Figura 18. Dado de ECAP utilizado.....	18
Figura 19. Microdurómetro shimadzu utilizado en el ensayo de microdurezas.....	19
Figura 20. Maquina utilizada para pruebas de desgaste.....	20
Figura 21. SEM Hitachi SU8020 utilizado para análisis de muestras.....	20
Figura 22. Pulidora Struers Lab Pol-1 utilizada para desbastar las muestras.....	21
Figura 23. Microscopio Óptico Nikon Epiphot utilizado para analizar las muestras.....	21
Figura 24. Celda electrolítica para el ataque de muestras con reactivo barker's.....	23
Figura 25. Micrografía del MEB y los espectros de EDS de las fases que constituyen la aleación secundaria Al-Zn-Mg obtenida de la reducción del ZnO en aluminio secundario.....	23
Figura 26. Imagen de la probeta después del primer paso ECAP. Diámetro de 10 mm y longitud de 5 cm aproximadamente.....	25
Figura 27. Imagen de la probeta después del segundo paso ECAP. Diámetro de 10 mm y longitud de 4.5 cm aproximadamente.....	25
Figura 28. Imagen de la probeta después del tercer paso ECAP. Diámetro de 10 mm y longitud de 4 mm aproximadamente.....	26
Figura 29. Imagen de la probeta después del cuarto paso ECAP. Diámetro de 10 mm y longitud de 3.5 cm aproximadamente.....	26
Figura 30. Imagen de la sección transversal de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, capturada con Microscopio Óptico a 100X. Tamaño de grano promedio de 113 μm	27

Figura 31. Imagen del paso 1 en ECAP, capturada con Microscopio Óptico a 100X. Tamaño de grano promedio de 52 μm	28
Figura 32. Imagen del paso 2 en ECAP, capturada con Microscopio Óptico a 100X. Tamaño promedio de grano de 39 μm	28
Figura 33. Imagen del paso 3 en ECAP, capturada con Microscopio Óptico a 100X. tamaño de grano promedio de 18 μm	29
Figura 34. Imagen del paso 4 en ECAP, se obtuvo por medio de un analizador de imágenes llamado mountainsmap. Tamaño promedio de grano de 16 μm	29
Figura 35. Imagen de la aleación Al 7075-T6, capturada con Microscopio Óptico a 100X. Tamaño promedio de grano de 38 μm	30
Figura 36. Imagen de MEB de la aleación Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.....	31
Figura 37. Imagen capturada con MEB Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.....	31
Figura 38. Imagen capturada con MEB después del primer paso ECAP.....	32
Figura 39. Imagen capturada con MEB después del primer paso ECAP.....	32
Figura 40. Imagen capturada con MEB después del cuarto paso ECAP.....	33
Figura 41. Imagen capturada con MEB después del cuarto paso ECAP.....	33
Figura 42. Imagen de MEB de la aleación Al7075 en condición T6.....	34
Figura 43. Imagen de MEB de la aleación Al7075 en condición T6.....	34
Figura 44. Análisis comparativo de las microdurezas de todas las muestras procesadas por ecap.....	35
Figura 45. Microdurezas obtenidas en la aleación de aluminio 7075-T6, el promedio de microdureza es de 183.32 HV.....	36
Figura 46. Grafica de los coeficientes de fricción del primer muestreo, en ECAP.....	37
Figura 47. Grafica de los coeficientes de fricción de las tres muestras de aluminio 7075-T6.....	38

Figura 48. Grafica de las pérdidas de volumen de los tres muestreos de la aleación de Al (Zn-Mg-Cu) secundario vaciado, y los pasos ecap aplicados a dicha aleación.....	39
Figura 49. Grafica de la perdida de volumen en las muestras de aluminio 7075-T6.....	40
Figura 50. Grafica de las pérdidas de volumen en las esferas en el tercer muestreo.....	41
Figura 51. Grafica de las pérdidas de volumen en esferas en aluminio 7075- T6.....	42
Figura 52. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.....	43
Figura 53. Ecap paso 1.....	43
Figura 54. Ecap paso 2.....	43
Figura 55. Ecap paso 3.....	43
Figura 56. Ecap paso 4.....	44
Figura 57. Al 7075- T6.....	44
Figura 58. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.....	44
Figura 59. Ecap paso 1.....	44
Figura 60. Ecap paso 2.....	44
Figura 61. Ecap paso 3.....	44
Figura 62. Ecap paso 4.....	45
Figura 63. Aleación de aluminio 7075-T6.....	45
Figura 64. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.....	45
Figura 65. Ecap paso 1.....	45
Figura 66. Ecap paso 2.....	45
Figura 67. Ecap paso 3.....	45
Figura 68. Ecap paso 4.....	46
Figura 69. Aleacion de aluminio 7075-T6.....	46

Figura 70. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.....	47
Figura 71. Escala para medición de figura 70.....	47
Figura 72. Ecap paso 1.....	47
Figura 73. Escala para medición de figura 72.....	47
Figura 74. Ecap paso 2.....	48
Figura 75. Escala para medición de figura 74.....	48
Figura 76. Ecap paso 3.....	48
Figura 77. Escala para medición de figura 76.....	48
Figura 78. Ecap paso 4.....	48
Figura 79. Escala para medición de figura 78.....	48
Figura 80. Aleación de aluminio 7075-T6.....	49
Figura 81. Escala para medición de figura 80.....	49
Figura 82. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.....	49
Figura 83. Escala para medición de figura 82.....	49
Figura 84. Ecap paso 1.....	49
Figura 85. Escala para medición de figura 84.....	49
Figura 86. Ecap paso 2.....	50
Figura 87. Escala para medición de figura 86.....	50
Figura 88. Ecap paso 3.....	50
Figura 89. Escala para medición de figura 88.....	50
Figura 90. Ecap paso 4.....	50
Figura 91. Escala para medición de figura 90.....	50
Figura 92. Aleación de aluminio 7075- T6.....	51

Figura 93. Escala para medición de figura 92.....	51
Figura 94. Aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado.....	51
Figura 95. Escala para medición de figura 94.....	51
Figura 96. Ecap paso 1.....	51
Figura 97. Escala para medición de figura 96.....	51
Figura 98. Ecap paso 2.....	52
Figura 99. Escala para medición de figura 98.....	52
Figura 100. Ecap paso 3.....	52
Figura 101. Escala para medición de figura 100.....	52
Figura 102. Ecap paso 4.....	52
Figura 103. Escala para medición de figura 102.....	52
Figura 104. Aleación de aluminio 7075-T6.....	53
Figura 105. Escala para medición de figura 104.....	53
Figura 106. Imagen capturada con SEM a x30.....	54
Figura 107. Imagen capturada con SEM a x70.....	54
Figura 108. Imagen capturada con SEM a x70.....	54
Figura 109. Imagen capturada con SEM a x30.....	55
Figura 110. Imagen capturada con SEM a x70.....	55
Figura 111. Imagen capturada con SEM a x70.....	55
Figura 112. Imagen capturada con SEM a x30.....	56
Figura 113. Imagen capturada con SEM a x70.....	56
Figura 114. Imagen capturada con SEM a x70.....	56
Figura 115. Imagen capturada con SEM a x30.....	57

Figura 116. Imagen capturada con SEM a x70.....	57
Figura 117. Imagen capturada con SEM a x70.....	57
Figura 118. Imagen capturada con SEM a x30.....	58
Figura 119. Imagen capturada con SEM a x70.....	58
Figura 120. Imagen capturada con SEM a x70.....	58
Figura 121. Imagen capturada con SEM a x70.....	59
Figura 122. Imagen capturada con SEM a x70.....	59
Figura 123. Imagen capturada con SEM a x70.....	59

TABLAS

Tabla I. Clasificación de aleaciones.....	3
Tabla II. Propiedades de tensión de la aleación 7075 (5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.23Cr), trabajada.....	6
Tabla III. Composición química de la aleación secundaria de Al (Zn-Mg-Cu) vaciado, obtenida por el método de espectrometría óptica de emisión por chispa.....	24
Tabla IV. Composición química nominal de la aleación de aluminio 7075. Según la ASM.....	24