



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

**EFFECTO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDOS METÁLICOS
EN ALEACIONES DE ALUMINIO PRODUCIDAS POR
INDUCCIÓN DE ALTA FRECUENCIA
(Síntesis y caracterización)**

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:

FALCÓN CASTREJÓN REYNA ANAHÍ

DIRECTOR:
DR. ISAÍ ROSALES CADENA

CUERNAVACA, MORELOS

NOVIEMBRE 2023



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas

A ti por dejarme volar, por dejarme hacer siempre lo que he querido...

RESUMEN

Una excelente y correcta aplicación de un material puede resultar a través de la combinación del bajo punto de fusión, adecuadas propiedades mecánicas y baja densidad ($2,7 \text{ g/cm}^3$), estas características se necesitan actualmente sobre todo en aplicaciones estructurales como la aeronáutica, militar y de transporte; Aleaciones a base Aluminio están cubriendo estos sectores debido a que cumplen con dichas características, sin embargo, cada vez son mayores las especificaciones que se requieren cubrir debido al avance tecnológico.

En el presente proyecto se desarrolla la adición de partículas de óxidos metálicos (Cu_2O y ZrO_2) a una matriz de Aluminio. En la síntesis de la aleación, las muestras se obtuvieron mediante el proceso de colada por agitación, al agregar 0.15 g, 0.25 g y 0.50 g de óxidos metálicos a 50 g de aluminio de alta pureza (99.98 %). Los resultados del estudio mostraron que los diferentes tratamientos térmicos y atmosféricos, dieron como resultado un aumento en la microdureza Vicker's desde un 45% a 62% sobre la matriz de Aluminio, indicando la creación de una solución sólida con estructura granular y tamaño de grano promedio uniforme.

A partir de los resultados de la caracterización microestructural, se observó que los óxidos metálicos inducen la modificación de la estructura dendrítica y el refinamiento del grano. Las propiedades eléctricas también mostraron un cambio significativo después de los tratamientos térmicos. Las caracterizaciones por difracción de rayos X muestran la formación de compuestos intermetálicos como: Al_2CuO_4 , CuO , ZrAl_3 , Al_2O_3 y en cantidades pequeñas AlO_3 , Al_2O_3 .

La adición de óxidos metálicos en matriz de Al ofrece la posibilidad de mejorar el desempeño del refuerzo en sus propiedades para requerimientos específicos.

ABSTRACT

An excellent and correct application of a material can result through the combination of low melting point, adequate mechanical properties and low density (2.7 g/cm³), these characteristics are currently needed especially in structural applications such as aeronautics, military and transportation; Aluminum-based alloys are covering these sectors because they meet these characteristics, however, the specifications that need to be covered are increasing due to technological advances.

In this report, the addition of metal oxide particles (Cu₂O y ZrO₂) with Al matrix has been presented. In the alloy synthesis, samples were obtained by stir casting process, by adding 0.15 g, 0.25 g, and 0.50 g of metal oxides to 50 g of high purity aluminum (99.98%). The results of the study showed that the different thermal and atmospheric treatments, gave results to an increase in the micro-hardness Vicker's, indicating the creation of a solid solution with granular structure and average uniform grain size.

From microstructural characterization results, it was observed that metal oxides induce modification of dendritic structure and grain refinement. X-ray diffraction characterizations shows the intermetallic compounds formation such as: Al₂CuO₄, CuO and ZrAl₃y Al₂O₃. Metal oxides addition in Al matrix offers the possibility of improving reinforcement performance in their properties for specific requirements.

AGRADECIMIENTOS

No podría empezar sin agradecer primeramente a mi familia que me apoyo incondicionalmente en este último año lleno de bastantes retos, que se siguen superando.

Un agradecimiento especial al Dr. Isaí Rosales Cadena y a CONACyT por la beca otorgada durante el periodo de investigación 2018-2022 así como, a el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) donde lleve a cabo este trabajo.

Agradezco también al comité tutorial formado por:

Dr. José Gonzalo González Rodríguez
Dra. Maryna Vasilivna Vlasova
Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín
Dra. Maura Casales Díaz (ICF-UNAM)
Dra. Estela Sarmiento Bustos (UTEZ)
Dra. América María Ramírez Arteaga

Y a todos aquellos que directa e indirectamente estuvieron en el proceso de concluir este proyecto.

Mil gracias.

CONTENIDO

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
AGRADECIMIENTOS	5
CONTENIDO.....	6
INDICE DE FIGURAS	9
INDICE DE TABLAS.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
JUSTIFICACIÓN	15
HIPÓTESIS	16
OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO.....	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	17
1.1 MATERIALES COMPOSITOS	17
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPOSITOS.....	21
1.2.1 Por tipo de Matriz.....	21
1.2.2 Por tipo de Refuerzo	22
1.2.3 Por tamaño	27
1.3 INTERFAZ MATRIZ-REFUERZO	27
1.4 MATERIALES COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC).....	30
1.4.1 Matrices utilizadas en los MMC	31
1.4.2 Refuerzos utilizados en los MMC.....	32
1.5 MATERIALES COMPOSITOS DE MATRIZ METALICA DE AL (AMMC)	33
1.6 METODOS DE FABRICACIÓN DE LOS MMC	38
1.6.1 Fundición con agitación	40
1.6.2 Prensado en caliente:	41
1.7 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE REFUERZO	42
1.7.1 Cu ₂ O	43
1.7.2 ZrO ₂	44
1.7.3 Metco™ 43C-NS.....	45
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA TEÓRICO EXPERIMENTAL	47
2.1 FABRICACIÓN DE MUESTRAS.....	47
2.1.1 Fabricación de muestras AMMC-ZrO ₂ y AMMC-Cu ₂ O	48

2.1.2	Fabricación de muestras Al- 43C-NS	49
2.2	TÉCNICA DE DESBASTE Y PULIDO.....	50
2.2.2	TÉCNICA DE ATAQUE QUÍMICO	50
2.2.3	REACTIVO QUÍMICO	51
2.3	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE EQUIPO.....	52
2.3.1	Crisoles desechables	52
2.3.2	Sistema de circulación de argón	54
2.3.3	Equipo de medición eléctrica.....	56
2.4	TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	59
2.4.1	Microscopio óptico.....	59
2.4.2	Microscopio electrónico de barrido (MEB).....	60
2.4.3	Rayos X.....	61
2.5	TRATAMIENTOS TERMICOS	63
2.5.1	Recocido	64
2.5.2	Temple	65
2.5.3	Revenido	66
2.5.4	Sinterizado	66
2.6	TECNICA DE CARACTERIZACIÓN MECANICA	67
2.6.1	Dureza Vickers (HV).....	67
2.7	TECNICA DE CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA	69
2.7.1	Resistividad	70
2.7.1	Conductividad.....	70
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		71
3.1	MATERIAL COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMINIO REFORZADO CON PARTÍCULAS DE ZRO ₂	71
3.1.1	Caracterización Microestructural	72
3.1.1.1	Difracción de Rayos X.....	73
3.1.2	Caracterización Mecánica	75
3.1.2.1	Dureza Vickers inicial de compositos.....	75
3.1.2.2.	Fluctuación de Dureza Vickers después de tratamientos térmicos.....	76
3.1.2.3	Fluctuación de Dureza Vickers con cambio de atmosfera	77
3.1.2.4	Fluctuación de dureza después de Temple en salmuera y Aceite	78
3.1.2.5	Fluctuación de dureza de todos los compositos.	79
3.1.3	Caracterización eléctrica	80

3.2 MATERIAL COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMINIO REFORZADO CON PARTÍCULAS DE Cu_2O	81
3.2.1 Caracterización microestructural.....	81
3.2.1.1 X-ray diffraction (XRD)	82
3.2.2 Caracterización Mecánica.....	86
3.2.2.1 Dureza Vickers (HV)	86
3.2.2.2 Fluctuación de HV en recocidos.	88
3.2.2.3 Fluctuación de HV de muestras con recocido en atmosfera de Argón.....	89
3.2.2.4 Fluctuación de HV de muestras con temple y revenido.	90
3.2.3 Caracterización Eléctrica	92
3.3 MATERIAL COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMINIO REFORZADO CON PARTÍCULAS DE Ni_80Cr_20	94
3.3.1 Caracterización microestructural.....	95
3.3.1.1 X-ray diffraction (XRD)	96
3.3.2 Propiedades Mecánicas.....	97
3.3.2.1 Dureza Vickers inicial de compositos.....	98
3.3.2.2 Fluctuación de Dureza Vickers después de tratamientos térmicos	99
3.3.2.3 Fluctuación de dureza después de Temple en salmuera.....	100
3.3.2.4 Fluctuación de dureza de todos los compositos	100
3.3.3 Caracterización Eléctrica	101
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS	104

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un material compuesto.	18
Figura 2. Clasificación de los materiales compuestos de acuerdo con el tipo de Refuerzo.	22
Figura 3. Compositos consolidados por dispersión. Tamaño de partícula de 10 a 250 nm.	23
Figura 4. Composito reforzado por partícula grande, se observan aglomerados verdaderamente particulados.	24
Figura 5. Fibras discontinuas en sus diferentes orientaciones.	25
Figura 6. Fibras continuas.	25
Figura 7. Refuerzo estructural en forma laminar. a) Acomodo de láminas o paneles. b) Corte transversal del composito.	26
Figura 8. Refuerzo estructural en forma de “sándwich”. a) Componentes de la estructura. b) Forma final de la estructura, conocida comercialmente como hojas de panal NOMEX.....	26
Figura 9. La unión de contacto entre la matriz y la fibra como refuerzo, es conocida como interfaz matriz- fibra	28
Figura 10. Aplicación de los MMC en la industria aeroespacial.....	31
Figura 12. Componentes del equipo utilizado para realizar la fundición por agitación. .	40
Figura 13. Método de prensado en caliente	41
Figura 14. Proceso general de fabricación de compositos	47
Figura 15. a) Diseño de crisol en Solid Edge b) Crisol fabricado.....	52
Figura 16. a) Corte de crisol. B) Composito completo desmoldado.....	53
Figura 17. Diseño de caja y fabricación de caja para circulación de Argón.....	55
Figura 18. Sistema de circulación de Argón	55
Figura. 19. Dispositivo del método de 4 puntas. a) Vista lateral b) Vista inferior	56
Figura 20. Principales diseños de pieza para prototipo base de sensor.....	57
Figura 21. Diseño de prototipo” base de sensor”.....	57
Figura 22. Prototipo impreso de base de sensor.	58
Figura 23. Microscopio Óptico	59
Figura 24. Proceso de funcionamiento del MEB.....	61
Figura 25. Equipo de difracción de rayos X.....	62

Figura 26. Acomodo de muestras en la mufla para recocido	65
Figura 27. Templado en Aceite y templado en Salmuera.....	65
Figura 28. Sinterizado de muestras. Se puede observar el cambio de color de las piezas.	66
Figura 29. Microdurómetro	67
Figura 30. (a) izquierda: indentador de diamante en forma de pirámide, (b) derecho: forma de las improntas	68
Figura 31. Identación.....	69
Figura 32. Arreglo para pruebas eléctricas.....	69
Figura 33. Medición 4 puntas.	70
Figura 34. Micrografías ópticas de Composite Al-ZrO ₂ con diferentes composiciones..	72
a) Comportamiento dendrítico. b) Dendrita refinada. c) Granos equiaxiados.....	72
Figura 35. Picos de difracción de rayos X para el material compuesto preparado para diferente peso.....	74
Figura 36. FWHM de los diferentes compositos. a) C1 b) C2 c) C3	74
Figura 37. Dureza Vickers de muestras después de tratamientos térmicos.	76
Figura 38. Fluctuación de dureza con cambio de atmosfera vs. Recocido normal.	77
Figura 39. Dureza Vickers de temples y revenidos.....	78
Figura 40. Dureza Vickers de compositos.	79
Figura 41. Resistividad eléctrica de compositos.....	80
Figura 42. Micrografías ópticas de las estructuras de aleaciones con diferentes composiciones. (a) 0.15 g. (b) 0.25 g (c) 0.50 g.	82
Figura 43. Patrón de difracción de rayos X de matriz de aluminio expuesta a recocidos.	83
Figura 44. Patrón de difracción de rayos X de muestras BA, AA y AAA con sus respectivas adiciones.	84
Figura 45. Porcentaje de ancho de picos de distintas aleaciones.	85
Figura 46. Fluctuación de dureza en correlación con el tamaño de grano.	87
Figura 47. Compendio de dureza de los recocidos.	88
Figura 48. Variación de dureza de muestras recocidas en distinta atmosfera.....	89
Figura 49. Fluctuación de dureza de temples y revenidos.	90
Figura 50. Fluctuación de dureza en los distintos tratamientos térmicos.	91

Figura 51. Gráfico de la variación de la conductividad eléctrica para muestras con diferentes tratamientos térmicos y diferentes adiciones de CuO ₂	93
Figura 52. Micrografía de la muestra M60	95
Figura 53. Fases de las muestras M60, M30, M20.....	96
Figura 54. Muestras M60, M30, M20.	97
Figura 55. Corte de piezas principales de las muestras M60, M30, M20.	97
Figura 56. a) Corte de muestras b) zonas de medición	97
Figura 57. a) Fluctuación de dureza por caras de la muestra M60. b) Distancia al centro de medición.	98
Figura 58. Promedio de dureza de las muestras M60, M30 y M20.....	99
Figura 59. Promedio de dureza de las muestras M60, M30 y M20 expuestas a recocido a 300°C b) Expuestas a 500 °C.....	100
Figura 60. Promedio de dureza de las muestras M60, M30 y M20 expuestas a recocido a 300°C y templadas en salmuera b) Expuestas a 500 °C y templadas en salmuera.	100
Figura 61. Fluctuación de dureza en los distintos tratamientos térmicos.....	101
Figura 62. Resistividad eléctrica.....	102

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diferentes procesos de fabricación.....	39
Tabla 2. Características de las partículas de Cu ₂ O	43
Tabla 3. Características de las partículas de ZrO ₂	45
Tabla 4. Características de las partículas 43C-NS	46
Tabla 5. Condiciones de fabricación de muestras AMMC- ZrO ₂ y AMC-Cu ₂ O	48
Tabla 6. Condiciones de fabricación de muestras	49
Tabla 7. Reactivo químico	51
Tabla 8. Condiciones de tratamientos	64
Tabla 9. Nomenclatura de muestras realizadas.	72
Tabla 10. Composición química de ZrO ₂ por porcentaje en peso	75
Tabla 11. Nomenclatura de muestras realizadas.	83
Tabla 12. Nomenclatura de muestras realizadas.	86
Tabla 12. Nomenclatura de muestras realizadas.	94
Tabla 13. EDS muestra M60	96

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos de matriz metálica (MMCs), en los últimos años ha generado un alto interés de investigación. Este tipo de materiales también llamados NMMC, es decir, materiales compuestos de matriz metálica reforzados con nanopartículas, han surgido como un material avanzado y han brindado la oportunidad de desarrollar las propiedades de un material de acuerdo con distintas necesidades industriales.

Los MMCs consisten en una matriz de metal adicionada con partículas utilizadas como refuerzos para mejorar su estructura cristalina y en consecuencia sus propiedades como pueden ser: mecánicas, eléctricas, térmicas u ópticas. Naturalmente, el aluminio (Al) como metal, tiene alta ductilidad y se puede procesar a temperaturas. El Aluminio y toda la serie de sus aleaciones cuentan con excelentes características y propiedades, sin embargo, es por su ligereza, que se han renovado y se han posicionado ahora como la matriz metálica más prometedora de estos MMCs.

Los compuestos de matriz metálica de Aluminio (AMMC) ahora tienen la mayor prioridad en aplicaciones donde estudios sobre corrosión, resistencia, baja densidad y alto rendimiento mecánico son requeridos. Por ejemplo, en sectores aeroespaciales, militar y de transporte se han aplicado debido a su alta resistencia específica, buenas propiedades de fatiga y resistencia al desgaste. Además, los AMMCs ofrecen la posibilidad de adaptar sus propiedades para cumplir requisitos específicos [1]. La propiedad de los AMMC depende de las propiedades de la matriz y el reforzamiento.

En los últimos años el reforzamiento de materiales compuesto de matriz metálica, en este caso, matriz de aluminio han sido altamente estudiados, adicionando partículas reforzadoras, que van desde ZnO, ZrO₂, MgO, B₄C, Al₂O₃, TiB₂ and SiC [1-7] a refuerzos no convencionales. Todos estos informes muestran la mejora de sus propiedades mecánicas.

De acuerdo con lo anterior en el presente trabajo se planteó sintetizar y caracterizar un material compuesto de matriz de aluminio; Aprovechando la existencia en bibliografía de una gran cantidad de resultados se proponen como partículas reforzadoras partículas de óxidos de cobre, óxidos de zirconio, níquel y cromo, los cuales han mostrado resultados positivos en propiedades mecánicas tales como dureza, desgaste, resistencia al impacto, tensión, entre otras. Con el fin de lograr un material ligero y resistente a alto impacto, para aplicaciones automotrices.

JUSTIFICACIÓN

De los materiales compuestos, los de matriz metálica, MMCs por sus siglas en inglés, son los que más se utilizan en la industria por el gran uso de aleaciones ligeras, por esto para han tenido como matriz al aluminio (Al), titanio (Ti) o magnesio (Mg). La razón de su estudio es el hecho de poder conseguir propiedades totalmente diferentes y casi imposibles de obtener en un material convencional y la razón de su fabricación es porque en función de las propiedades que se desea obtener se pueden buscar unas aplicaciones específicas.

En la última década el reforzamiento de materiales compuestos de matriz metálica, en este caso, matriz de aluminio o AMMC, por sus siglas en inglés, ha sido altamente estudiados, adicionando una extensa gama de refuerzos en forma de partículas, fibras o laminas, todos estos informes muestran el alto impacto que estos AMMCs han tenido, debido a su baja densidad y altos valores de resistencia mecánica y al desgaste, así como, demuestran una mejoría en sus propiedades eléctricas y térmicas.

Debido a esto es necesario continuar en la búsqueda de las características únicas que deben tener las partículas como refuerzo, para mejorar las propiedades de un material de acuerdo a las necesidades requeridas para diferentes aplicaciones; ya que se prevé que compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas metálicas, sean una innovación y den pie al desarrollo de nuevos materiales que sustituyan sus necesidades estructurales, como por ejemplo: reemplacen los materiales monolíticos así como aleaciones actuales de aluminio, aleaciones ferrosas, aleaciones de titanio e incluso compuestos a base de polímeros y cerámicos en varias aplicaciones. Esto puede ofrecer soluciones económicamente viables para una amplia variedad de aplicaciones comerciales.

La motivación para este trabajo recae principalmente en dos aspectos:

- El empleo de la técnica de fundición por agitación, la cual es una excelente y económica vía para fabricar materiales compuestos.
- El uso de partículas metálicas y de óxidos metálicos como fase de refuerzo.

HIPÓTESIS

Por medio del método de fundición por agitación podemos crear un material compuesto de matriz metálica (Aluminio) con partículas metálicas y de óxidos metálicos como refuerzo, dando como resultado la formación de un compositos de matriz de aluminio o AMMCs, con propiedades superiores a la matriz de aluminio puro al 99%. Los AMMCs obtenidos en combinación con distintos tratamientos térmicos como recocido, templado, revenido y sinterizado, podrán mejorar las propiedades mecánicas como la dureza y las propiedades eléctricas como la resistividad y en consecuencia la conductividad. Con esto se logrará contribuir a la gama de propiedades que pueden ser controladas para adaptarlas a distintas aplicaciones industriales, debido a la síntesis y caracterización de los AMMCs propuestos.

OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO

Sintetizar y caracterizar mecánica y eléctricamente un material compuesto de matriz metálica (aluminio) reforzada con partículas metálicas y de óxidos metálicos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros óptimos para la fabricación de las muestras y tratamientos térmicos a las que serán sometidas.
- Estudiar el efecto de la variación de adición de partículas en función de las propiedades mecánicas y eléctricas.
- Evaluar las propiedades mecánicas y eléctricas en función de tratamientos térmicos.
- Correlacionar la morfología con el comportamiento mecánico y eléctrico de los compositos de aluminio en función de la adición de partículas y tratamientos térmicos.
- Determinar las fases finales de óxidos presentes en todos los AMMCs.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 MATERIALES COMPOSITOS

En la actualidad diferentes materiales y aleaciones metálicas, cerámicas y materiales poliméricos convencionales no pueden cumplir con las combinaciones inusuales de propiedades, que el constante crecimiento de aplicaciones industriales actuales y modernas requieren.

Por ejemplo, los ingenieros aeronáuticos buscan cada vez más materiales estructurales que tengan bajas densidades, sean fuertes, rígidos y resistentes a la abrasión y al impacto, y que no se corroan fácilmente. Para cumplir con lo anterior el uso de los materiales compositos en la industria aeronáutica y automotriz ofrecen ventajas económicas al fabricante ya que al usar materiales compositos el peso de la estructura se reduce, lo que permite un notable aumento de carga útil y ahorro de combustible. La resistencia y rigidez por unidad de masa de estos nuevos materiales es netamente superior a la de los materiales estructurales clásicos o convencionales.

Los materiales compositos, que han surgido como un material avanzado y han demostrado que su principal aportación es su versatilidad en la obtención de propiedades complejas es lo que los hacen muy atractivos para ser utilizados en aplicaciones estructurales para la industria de alta tecnología como automotrices, electrónicas, deportivas y muchas otras aplicaciones industriales [8].

De acuerdo con lo expresado por A. Miravete y L. Castejón [9], se deben ajustar el término de material composito sobre aquellos materiales fabricados o desarrollados por la mano del hombre, dejando por fuera de la definición de compuesto a una gran variedad de materiales naturales, como los huesos, las maderas, etc. En este contexto, un material composito es un material formado por la combinación micro o macroscópica de dos o más materiales distintos en composición y forma, pero dichos materiales constituyentes conservan su identidad y propiedades, de tal manera que presentan una o más interfaces discretas, pero visibles entre ellas. El comportamiento y las propiedades de estos

materiales son determinados por tres factores: las propiedades intrínsecas de los constituyentes, la forma y el arreglo estructural de los constituyentes y la interacción entre ellos.

Se componen de dos elementos que son la fase continua y la discontinua, los cuales presentan una sinergia que permiten obtener propiedades en conjunto.

La matriz es la fase continua, la responsable de mantener el refuerzo en su lugar, es por eso, que se dice que el refuerzo queda “embebido”. La matriz, por lo general, es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto (fig.1).

La fase discontinua, dispersa o también conocido como refuerzo, es aquel que se agrega a la matriz normalmente de forma uniforme para conferir al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar propiedades mecánicas, pero, también, se emplean refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión [9-11].

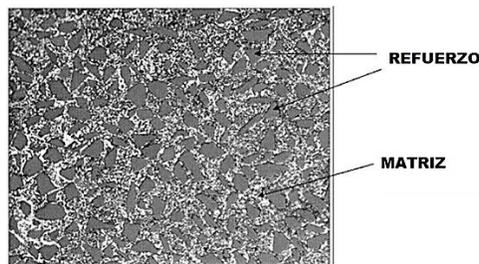


Figura 1. Componentes de un material compuesto.

En términos generales, se considera que un material compuesto es cualquier material multifásico que exhibe una proporción significativa de las propiedades de ambas fases constituyentes de manera que se logra una mejor combinación de propiedades. De acuerdo con este principio de acción combinada, se forman mejores combinaciones de propiedades mediante la unión juiciosa de dos o más materiales distintos.

Las combinaciones y la gama de las distintas propiedades de los materiales se han ampliado a través del tiempo y se siguen ampliando, con el desarrollo de estos nuevos materiales compuestos; los primeros datan a inicios del año 3400 a. C., cuando los mesopotámicos crearon madera contrachapada pegando tiras de diferentes maderas en diferentes ángulos. Creaciones similares ocurrieron durante casi cinco mil años, pero alrededor del año 1200 d. C. es donde se existe el registro del primer arco creado de restos de huesos y tendones de animales, madera, pegamento de origen animal y corteza de abedul, herramienta que era temida y ayudo a conseguir el dominio de Genghis Khan. [12-13].

Para el año 1907, Leo Hendrik B. obtuvo la primera patente de la baquelita (resinas termo-resistentes de formaldehido), catalogado como el primer compuesto de matriz polimérica sintética desarrollado por el hombre, dado que esta es una combinación de un polímero (matriz) con harina de madera o fibras de asbesto (refuerzo), la cual es resistente al calor y no es conductora. Para 1908 fue reconocido como el pionero de la industria de los polímeros completamente sintéticos [14-15].

En el año de 1936 DuPont lanzo una resina adecuada para combinar las fibras de vidrio “fiberglass”, desarrollando un material compuesto, al combinar fibras de vidrio con la matriz polimérica, ofreciendo un material con una alta relación resistencia-peso, dicho material se volvió crítico durante la segunda guerra mundial y se produjo en masa para barcos y fuselajes, lo que finalmente llevo a la producción de automóviles en la década de 1950. En esta misma década el crecimiento de materiales compuestos reforzados con fibra se desarrolló de manera exponencial, en 1958 Gordon y Arch encontraron que las fibras monolíticas y casi perfectas eran débiles entre más grandes eran, debido a que tenían fallas geométricas superficiales creadas en el proceso de crecimiento, a partir de ahí existió mayor atención al cuidado de preparación, la usencia de defectos y se inició la incursión en nuevos métodos de fabricación de materiales compuestos [16].

En 1959 se logró por primera vez fabricar por deposición de vapor químico una fibra continua de alta resistencia y alto modulo elástico, para 1960 Akio Shindo desarrollo fibras

de carbono de alta resistencia [17]. De 1965 a 1971, las aplicaciones de los materiales compuestos se expandieron e implementaron completamente en la industria automotriz, desarrollando nuevos materiales para neumáticos, de la misma manera ocurrió para la industria aeronáutica y espacial, pues en 1970 el precio de los materiales se había elevado en el mercado, lo que los obligo a mejorar e incursionar en aplicar los materiales compuestos y con esto reemplazar los convencionales. [16]

Al diseñar materiales compuestos, los científicos e ingenieros han combinado ingeniosamente varios metales, cerámicas y polímeros para producir nuevos materiales extraordinarios. La mayoría de los compuestos se han creado para mejorar las combinaciones de características mecánicas y físicas deseadas, como peso, rigidez, tenacidad, resistencia ambiental y a alta temperatura, así como características especiales en el desarrollo de formas complejas.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPOSITOS

1.2.1 Por tipo de Matriz

Los materiales compositos actualmente son clasificados de tres maneras. La primera es de acuerdo con el tipo de material usado para la matriz [18], se dividen en:

- Materiales compositos de matriz metálica o MMC (Metal matrix composites):
Se utilizan cada vez más en la industria automotriz. Estos materiales están formados por una matriz metálica, por lo general metales “livianos” como el aluminio, titanio o magnesio.
- Materiales compositos de matriz cerámica o CMC (Ceramic matrix composites):
Se utilizan en aplicaciones de alta temperatura. Estos materiales están formados por una matriz cerámica y un refuerzo de fibras cortas, o whiskers, como por ejemplo de carburo de silicio o nitruro de boro.
- Materiales compositos de matriz orgánica o polimérica o RP (Reinforced plastics) también conocida como matriz de plástico, se caracteriza por su baja densidad, alta tenacidad, alta resistencia a la corrosión, baja resistencia mecánica, bajo coste, rapidez y sencillez de conformado. También hay que tener en cuenta a la hora de trabajar con este tipo de matrices la influencia que tienen las condiciones medioambientales sobre los polímeros, tales como humedad, temperatura y radiación solar. Las matrices orgánicas o poliméricas pueden ser de varios tipos: termoplásticas, duroplásticos o termoestables y elastómeros.

1.2.2 Por tipo de Refuerzo

La segunda clasificación es referente a la forma del refuerzo (fig.2), de acuerdo con esto, se clasifican en compositos reforzados por partículas, por fibras, que pueden ser cortas o continuas y por cristales simples elongados (whiskers) [19-21].

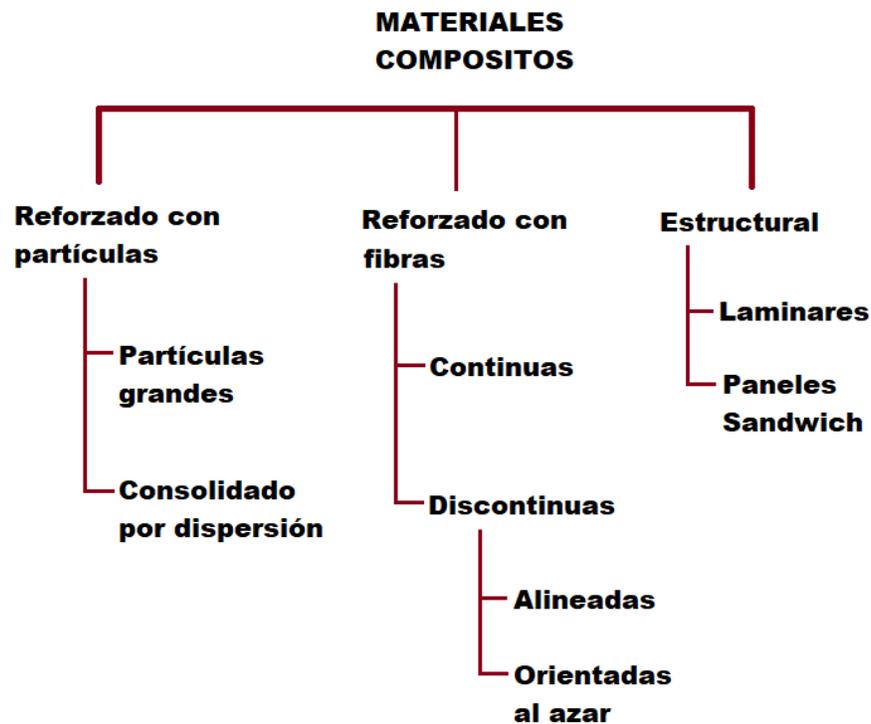


Figura 2. Clasificación de los materiales compuestos de acuerdo con el tipo de Refuerzo.

Los compositos reforzados con partículas se dividen en compositos de partículas grandes y compositos de dispersión o consolidados por dispersión [22].

- Los compositos consolidados por dispersión (fig.3): Son aquellos en los cuales las partículas poseen de 10 a 250 nm de diámetro, para algunos compositos hasta 10 micras. Las partículas dispersas, por lo general, óxidos metálicos, se introducen en la matriz con métodos distintos, pero enfocados a las transformaciones de fases empleadas en el desarrollo del composito. A temperatura ambiente, los

compositos endurecidos por dispersión pueden ser menos resistentes que las aleaciones tradicionales. Sin embargo, la resistencia de estos materiales compositos decrece en menor medida al incrementarse la temperatura, dado que no ocurren los fenómenos típicos que reducen la resistencia mecánica de las aleaciones. Es importante que el dispersante tenga baja solubilidad en la matriz y no reaccione químicamente con ella, aunque un pequeño grado de solubilidad puede ayudar a mejorar la unión entre los componentes.

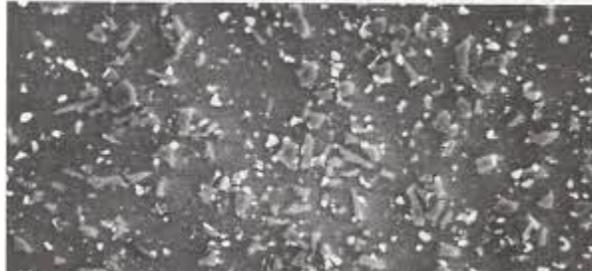


Figura 3. Compositos consolidados por dispersión. Tamaño de partícula de 10 a 250 nm.

- Compositos de partículas grandes (fig.4): También se les denomina aglomerados o verdaderamente particulados. Dado su tamaño, la interacción de estas partículas con la matriz no tiene lugar a nivel atómico o molecular, y sus efectos se producen a nivel macroscópico. Las partículas restringen los movimientos de la matriz que les rodea y van a soportar una parte importante de las fuerzas que se ejercen sobre ella. Las partículas pueden tener geometrías y tamaños diferentes, pero se debe tratar de que presenten la misma dimensión en todas las direcciones, para evitar orientaciones con mayor fragilidad. Debemos tener en cuenta que la cohesión con la matriz será mejor cuanto menor sea tamaño y más homogénea sea su distribución.

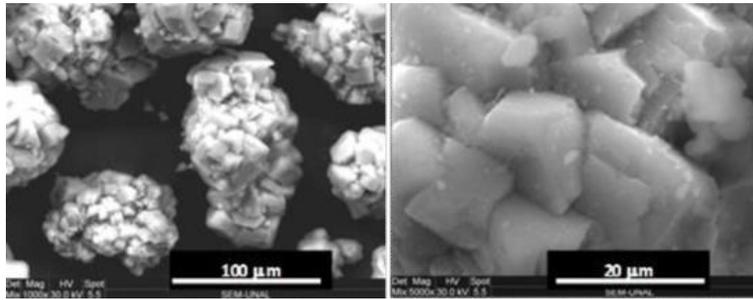


Figura 4. Composito reforzado por partícula grande, se observan aglomerados verdaderamente particulados.

Los compositos reforzados por fibras, son aquellos que en su mayoría consiguen una mejor rigidez, resistencia a la fatiga y relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas, aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil, la matriz transmitirá la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada manteniéndolas en su posición correcta, las protege de sufrir daños durante su manufactura y uso, y evita la propagación de grietas en las fibras a lo largo del composito.

Los factores que se deben tener en cuenta para la creación de este tipo de compositos son: longitud, diámetro, orientación, concentración, propiedades de las fibras y la conexión entre las fibras y la matriz [23].

Se puede subdividir en fibras continuas y discontinuas:

- Las fibras discontinuas (fig.5) pueden estar alineadas u orientado al azar. La disposición u orientación de las fibras entre sí, la concentración de fibras y la distribución tienen una influencia significativa en la resistencia y otras propiedades. Con respecto a la orientación, son posibles dos extremos: Alineación paralela del eje longitudinal de las fibras en una sola dirección y totalmente aleatoria.

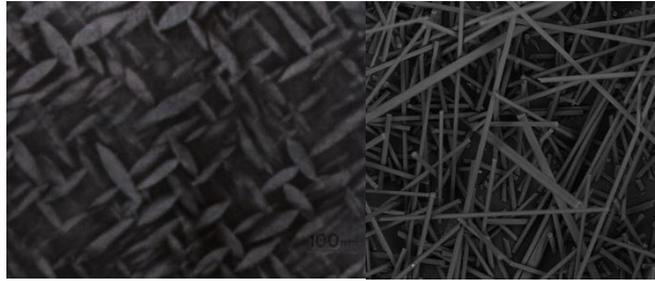


Figura 5. Fibras discontinuas en sus diferentes orientaciones.

- Las fibras continuas (fig.6) normalmente están alineadas y no tiene cortes, por lo cual la longitud de la fibra l es igual a la longitud crítica l_c , es decir con $l > 15l_c$, si este es menor, ya se considera como una fibra discontinua.



Figura 6. Fibras continuas.

Los materiales compositos estructurales más utilizados son los llamados laminares (fig.7) y los paneles sándwich (fig.8) [24]. Los compositos laminares están formados por láminas o paneles bidimensionales, donde la orientación de estos, en su mayoría se encuentran con un giro de 90° de tal manera que en cada capa sucesiva tendrá diferente orientación, como resultado, se puede encontrar alta resistencia en varias direcciones en el composito.

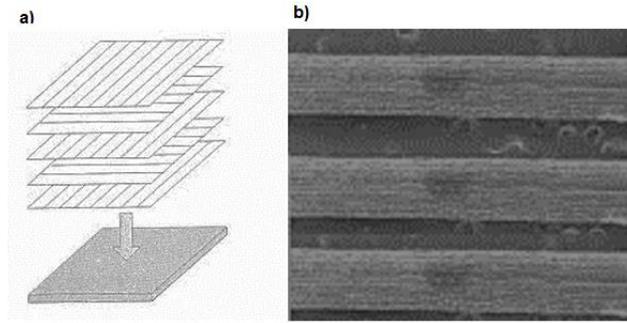


Figura 7. Refuerzo estructural en forma laminar. a) Acomodo de láminas o paneles. b) Corte transversal del compuesto.

En un panel sándwich, un núcleo más grueso separa dos láminas delgadas. El núcleo es generalmente liviano y proporciona soporte a las caras exteriores, debe poder evitar el pandeo del panel sándwich. Las caras exteriores están unidas adhesivamente al núcleo. En la mayoría de los casos, las caras deben estar hechas de un material fuerte y rígido como el acero, titanio, aleaciones de aleación, etc. para soportar diversas tensiones debido a la carga.

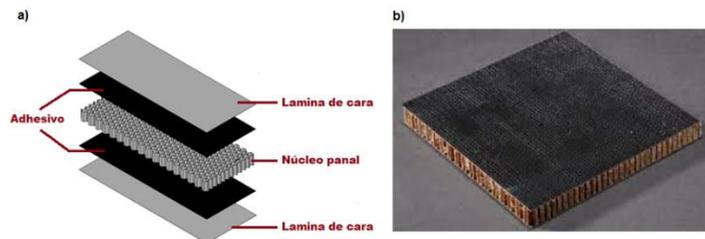


Figura 8. Refuerzo estructural en forma de “sándwich”. a) Componentes de la estructura. b) Forma final de la estructura, conocida comercialmente como hojas de panel NOMEX.

1.2.3 Por tamaño

Esta es una clasificación que ha surgido debido a que, el avance tecnológico en la fabricación de los materiales compuestos, así como, la gran cantidad de información que se continúa generando debido a la investigación de estos, ha concluido en la mayoría de los casos que las mejores propiedades en los compuestos se presentan cuando el tamaño del reforzamiento es menor. Aunado a esto, el avance en el estudio de las partículas y su sinterización, han logrado la aparición de nuevas partículas como las de escala submicrométrica (o nanométrica). En este contexto, cuando los tamaños de las fases empleadas en los compuestos son del orden nanométrico, se habla de un nanocompósito o materiales compuestos reforzados con nanopartículas (NMMCs), siempre y cuando el refuerzo sea inferior a los 100 nm.

Estos materiales difieren básicamente de los compuestos tradicionales en los tamaños de sus fases, debido a esto se ha atribuido que exhiben propiedades que a menudo son superiores y algunas veces, completamente nuevas provocadas por el efecto del tamaño tan pequeño, muestran mayor dispersión u homogeneidad y en consecuencia la creación de una interfaz matriz-refuerzo con mayor estabilidad [25]. Sin embargo, lograr un acomodo homogéneo de partículas tan finas, continúa siendo el objetivo de muchos investigadores.

1.3 INTERFAZ MATRIZ-REFUERZO

En un material compuesto, la zona de interfase es una región de composición química variable, donde tiene lugar la unión entre la matriz y el refuerzo, que asegura la transferencia de las cargas aplicadas entre ambos y condiciona las propiedades mecánicas finales de los compuestos. Su objetivo es conseguir la unión entre las propiedades del refuerzo y de la matriz sin importar el método de fabricación (fig.9).

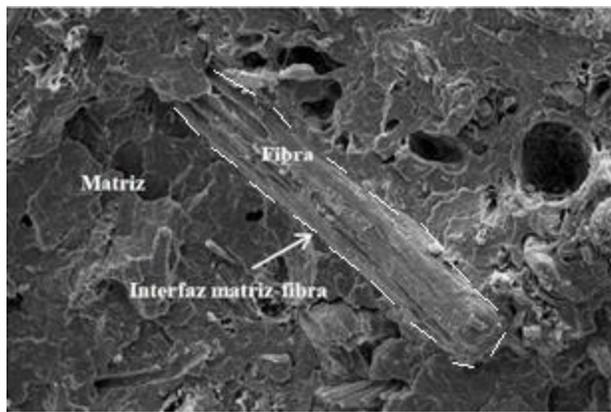


Figura 9. La unión de contacto entre la matriz y la fibra como refuerzo, es conocida como interfaz matriz- fibra

Se distinguen esencialmente dos tipos de interfaz:

- Reactiva: La matriz y el refuerzo tiene afinidad química y tiene lugar la formación de una o más interfaces en la zona de contacto.
- No reactiva: No hay interacción química, la unión es más débil y no presenta cohesión, debido a esto el riesgo de desprendimiento y aumento en la velocidad de deterioro de las propiedades del material.

En la interfase existen cuatro factores que se deben considerar, debido a que de ellos dependerán las características de dicha unión. Un material compuesto puede cumplir con uno o más factores. El factor mecánico se enfoca en la rugosidad que poseen los materiales, el electrostático dependerá del tipo de cargas que tiene la superficie tanto del refuerzo como la matriz, el factor químico existe cuando el refuerzo posee grupos químicos compatible con los grupos químicos de la matriz y el último factor a considerar es mediante el estudio de la interdifusión que ocurrirá en la superficie del refuerzo hacia la matriz; la resistencia de esta unión dependerá de la cantidad del refuerzo y por lo general se aumenta con la adición de otro tipo de refuerzos [26- 27].

Existen también algunas cualidades necesarias para garantizar una unión interfacial adecuada entre la matriz y el reforzante, por ejemplo: la mojabilidad del reforzante por parte de la matriz, que asegure un contacto inicial para luego, en el mejor de los casos, generar la unión en la interfase con una estabilidad termodinámica apropiada, la

existencia de fuerzas de unión suficientes que garanticen la transmisión de esfuerzos de la matriz al refuerzo y que sean además estables en el tiempo bajo altas temperaturas.

Con el paso del tiempo se han desarrollado y se siguen investigando métodos para mejorar la interfaz, entre ellos se encuentran: Las teorías de adhesión, adsorción y humectación, interdifusión, atracción electrostática, enlace químico, adhesión mecánica, esfuerzos residuales, proceso rapi-press, fundición, entre otros [28-30].

Sin embargo, son métodos específicos para cada composito pues cada material tiene sus propias características. En la actualidad en ocasiones lo que se necesita para lograr una correcta unión química o interdifusión es incluir otro material, por ejemplo: A.A.R. Adduhah et al. (2010) en su investigación llamada “Microstructural study of copper-carbon composite interface” variaron parámetros de fabricación como la temperatura, tiempo y presión de fabricación, sin embargo, no consiguieron una interacción química ni un contacto difusivo entre el cobre y el carbono, pero Z.A. Hamid et al. (2011) en el proyecto que lleva por nombre “Fabrication and characterization copper/diamond composites for heat sink application using powder metallurgy” y B. Lin et al. (2015), en su artículo “Interface characterization of a Cu-Ti-coated diamond system” demostraron la unión química con el uso de carburizantes. Por lo anterior, todo material composito no solo necesita ser creado, si no que la importancia del estudio de su interfase tiene un valor óptimo y suficiente para asegurar la correcta unión matriz-refuerzo y con esto poder adaptar y controlar sus distintas propiedades a aplicaciones industriales comerciales.

1.4 MATERIALES COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA (MMC)

Como se ha mencionado anteriormente en el presente trabajo se estudiará un material compuesto de matriz metálica, MMC por sus siglas en inglés.

Los MMCs son materiales compuestos constituidos por dos materiales disímiles, cuya matriz es de elementos químicos metálicos y sus refuerzos pueden ser cerámicos, óxidos o materiales metálicos. Tanto el refuerzo como la matriz de un MMC deben diferir uno del otro de forma o composición a nivel macro o microscópico, pero sin olvidar que deben mostrar una discreta, pero visible interfaz que tendrá lugar durante la solidificación y el enfriamiento [31].

Los refuerzos usualmente utilizados en los MMC son: Fibras cortas o continuas y partículas o nanopartículas.

En cuanto a las propiedades mecánicas, han demostrado ser superiores con respecto a los materiales que los componen individualmente, las propiedades térmicas y eléctricas han logrado el aumento y control de la conductividad, esta mejora se ha atribuido a la morfología, fracción de volumen, tamaño y distribución de refuerzos térmicos en la matriz [25] [30] [32].

Las aplicaciones industriales de los MMCs a través del tiempo como se ha mencionado anteriormente han logrado expandirse en los sectores automotriz, aeroespacial (fig.10), militar, eléctrica y electrónica, los cuales usualmente exigen la modificación de propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas. En la siguiente imagen se observa la aplicación de los compuestos en una aeronave espacial moderna, donde el objetivo de estos es obtener estructuras ultraligeras, mejorar LC'S, TPS y compuestos que resistan altas o muy bajas temperaturas.

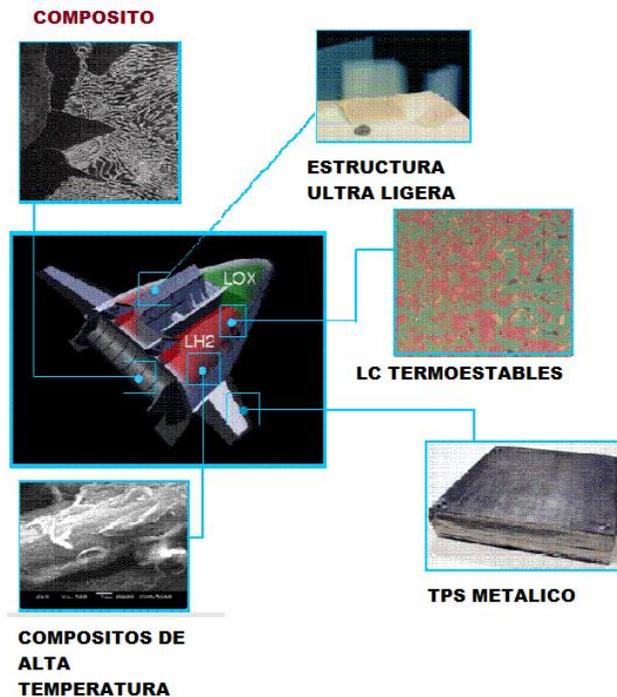


Figura 10. Aplicación de los MMC en la industria aeroespacial.

1.4.1 Matrices utilizadas en los MMC

Para la creación de los MMCs se han destacado el uso de materiales como: Cobre, hierro y acero. Sin embargo, las matrices más utilizadas son Aluminio (Al), magnesio (Mg), Titanio (Ti) y sus aleaciones [33]. Esto debido a sus propiedades y características.

- El aluminio (Al), tiene un comportamiento de pasivación y es el metal más ligero y económico.
- El titanio (Ti), tiene la desventaja en su alto costo, pero permite ser utilizado a temperaturas hipotérmicas.
- El magnesio (Mg), tiene la principal ventaja de ser el de menor densidad, pero también la mayor desventaja es que es necesario protegerlo frente a la oxidación.

1.4.2 Refuerzos utilizados en los MMC

Los MMCs por lo general son reforzados con fibras continuas, cortas o partículas (figuras 3-5), comúnmente pueden ser cerámicos, óxidos o también materiales metálicos.

En los últimos años el reforzamiento de los MMCs, han sido altamente estudiados, adicionando partículas reforzadoras, que van desde SiC, B₄C, TiC, Si₃N₄, SiC, BN, B₄C, TiC, Al₂O₃, ZrO₂ and C etc. a refuerzos no convencionales, también han adicionado fibras continuas como las de carburo de silicio (SiC), alúmina (Al₂O₃) y boro (B), estas fibras ocupan fracciones del 40 al 70% del volumen total del compuesto y son las que se usan con mayor frecuencia demostrando una mejoría de propiedades mecánicas. Las fibras discontinuas ocupan solamente del 10 al 30% del volumen total y las más utilizadas son de carburo y nitruro de silicio [34].

Todos estos informes muestran la versatilidad que los composites poseen y la facilidad para poder adaptar sus propiedades y mejorarlas, como se observa en la siguiente figura.

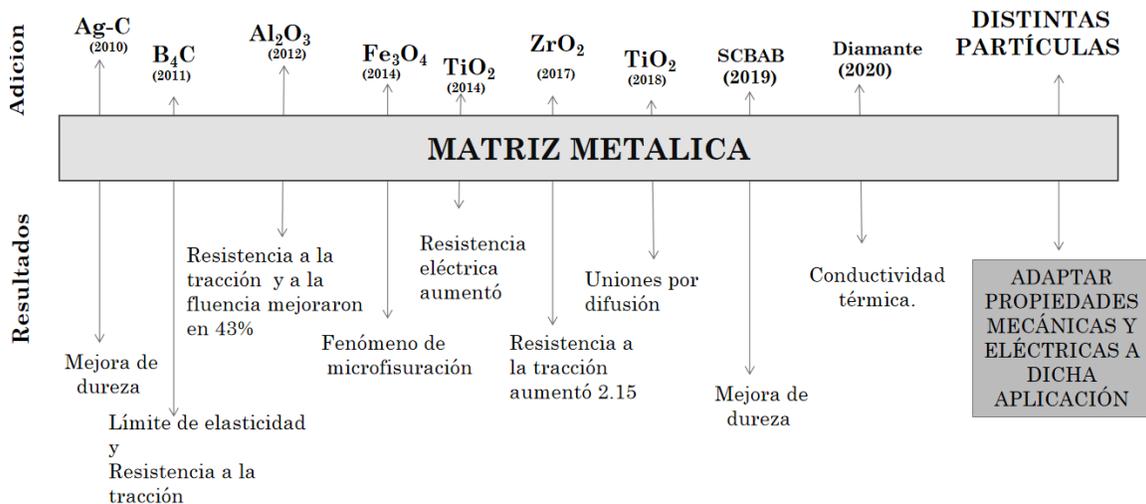


Figura 11. Distintos refuerzos de una matriz metálica en la última década.

1.5 MATERIALES COMPOSITOS DE MATRIZ METALICA DE AL (AMMC)

Sabemos que dentro de los metales más utilizados como matriz en los MMCs se encuentra el aluminio (Al), magnesio (Mg) y titanio (Ti), el presente trabajo se centra en utilizar una matriz de aluminio.

En la última década los compositos de matriz metálica de Aluminio o AMMC, han sido estudiados y desarrollados, debido a la combinación única de propiedades que presentan el aluminio y sus aleaciones, hacen de este material uno de los más versátiles, económicos y atractivos para una amplia gama de usos y aplicaciones.

Entre las mejores características y propiedades que presenta el aluminio se mencionan las siguientes [33,35]:

- Las aleaciones de aluminio ocupan el segundo lugar (con respecto a los aceros) en los materiales que se utilizan con fines estructurales.
- Resiste el tipo de corrosión progresiva.
- Las superficies de aluminio pueden ser altamente reflectantes.
- Tiene una excelente conductividad eléctrica y térmica.
- Algunas aleaciones presentan altos grados de resistividad eléctrica.
- El aluminio es no ferromagnético.
- Puede ser colado por cualquier método de fundición.
- No hay límite a los diferentes perfiles en las que el metal puede ser extruido.

Lo anterior, confirma el por qué en la última década el aluminio y sus aleaciones han sido utilizados como matriz y reforzado con diferentes partículas.

A continuación, se muestra un marco referencial de como las distintas partículas utilizadas como refuerzos han logrado que los AMMCs se posicionen como uno de los materiales compositos más utilizados y aplicados en la industria.

- Un trabajo publicado en 2012 por Bedolla E. et al., que lleva como título “Synthesis and characterization of Mg-AZ91/AlN composites” muestra el proceso de síntesis y caracterización mecánica y microestructural de un material compuesto, en este caso Mg-AZ91/AlN, donde se evalúa la distribución de la matriz y del refuerzo, la aparición de precipitados en el material luego del proceso de síntesis, el módulo de elasticidad, la dureza, el coeficiente de expansión térmica y la resistividad eléctrica del material. Este análisis muestra que el refuerzo fue distribuido homogéneamente en la matriz y se detectaron pequeños precipitados como MgO, AlN y Mg₁₇Al₁₂. Además, se encontró que el material presenta un valor promedio de módulo de elasticidad de 133 GPa y dureza de 24 HRC (260 HV). El coeficiente de expansión térmica fue de $9.53 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y la resistividad eléctrica fue de $45.9 \times 10^6 \text{ } \Omega\text{-cm}$.
- S. Johnny James et al. (2014), en su trabajo titulado “Hybrid Aluminium Metal Matrix Composite Reinforced with SiC and TiB₂”. Realizaron la preparación del compuesto de matriz metálica de aluminio híbrido mediante el refuerzo de carburo de silicio y diboruro de titanio. La prueba de dureza muestra que la adición de refuerzo SiC y TiB₂ aumenta el valor de dureza. Pero un aumento en el refuerzo hasta un 15% en peso revela una reducción en el valor de la dureza. A partir de los resultados de las pruebas de tracción, se ha observado que la adición de SiC de refuerzo al metal base agregó un 20 % de resistencia al material compuesto, pero se registra una reducción de la adición de TiB₂ en un 50 - 60 % de resistencia. El análisis de la prueba de desgaste demostró que la adición de TiB₂ aumentó el comportamiento de resistencia al desgaste del compuesto.
- El trabajo publicado en 2017 por V.A.Popov et al., que lleva por nombre “Particulate metal matrix composites development on the basis of in situ synthesis of TiC reinforcing nanoparticles during mechanical alloying” se desarrolla la síntesis in situ de nanopartículas de refuerzo de carburo de titanio a partir de precursores de nanodiamantes dentro de una matriz de aluminio o cobre. La investigación mostró que el material desarrollado estaba compuesto por una matriz

metálica y nanorefuerzos de carburo de titanio con un tamaño promedio de aproximadamente 22-23 nm. No se produjo ninguna reacción entre la matriz y las partículas de refuerzo a temperaturas de hasta 900 °C para el cobre y 750 °C para el aluminio. Este compuesto de aluminio desarrollado se puede aplicar como aleación maestra para tecnologías de fundición.

- J. Fayomi et al. En su trabajo realizado en 2019, titulado “Experimental study of $ZrB_2-Si_3N_4$ on the microstructure, mechanical and electrical properties of high grade AA8011 metal matrix composites”. Evaluaron el efecto híbrido de $ZrB_2-Si_3N_4$ en las propiedades de los composites de matriz metálica (AMMC) AA8011 desarrollados mediante un proceso de fundición por agitación de dos pasos. El porcentaje de refuerzo varía de 0% a 20% en peso. A partir de los resultados, se reveló que las propiedades mecánicas de la aleación reforzada están muy mejoradas en comparación con la aleación no reforzada. Las imágenes de micrografía óptica y micrografía electrónica de barrido con espectroscopia de dispersión de energía muestran la distribución uniforme de las partículas híbridas de $ZrB_2-Si_3N_4$ sin porosidad visible. La resistividad eléctrica de los composites AA8011 desarrollados también mejoró con el aumento del porcentaje en peso de las partículas cerámicas, pero la conductividad eléctrica se redujo drásticamente.
- En 2020, se presentó un artículo escrito por Zahid Sohag et al. titulado “Effect of ceramic reinforcement on the microstructural, mechanical and tribological behavior of Al-Cu alloy metal matrix composite”. En este estudio, el compuesto de matriz de aleación de aluminio y cobre reforzado con SiC y TiC se fabrica mediante un proceso de fundición por agitación. En este estudio, la cantidad de cobre se fija en 2% en peso y el contenido de SiC-TiC varía de (2% en peso a 8% en peso) en un intervalo de 2% en peso. El análisis XRD reveló que no hay reacción entre la matriz y la fase de refuerzo. El análisis microestructural muestra que existe una distribución uniforme de las partículas de refuerzo. Se investigó la densidad y la dureza de los composites, lo que muestra que el aumento en el contenido de refuerzo aumenta la dureza, mientras que la densidad disminuye. El estudio de

desgaste revela que los composites reforzados con SiC y TiC muestran índices de desgaste más bajos. Se espera que este compuesto sea beneficioso para las aplicaciones de envío.

- El trabajo titulado “Study of mechanical and metallurgical characterization of correlated aluminium hybrid metal matrix composites” publicado en 2021, por V.Boobesh Nathan et al. Investiga la caracterización mecánica y metalúrgica de composites de matriz de metal híbrido de aluminio correlacionados (AHMMC) en los que el aluminio se utiliza como matriz con dos materiales de refuerzo incrustados. La aleación de aluminio 6061 se tomó como material base con un refuerzo variable de x porcentajes en peso (2, 4, 6% en peso) de carburo de silicio (SiC) y un valor fijo de 3% en peso de dióxido de circonio (ZrO_2). Los resultados revelaron que la dureza, la resistencia a la tracción, la resistencia a la compresión y la energía de impacto aumentan al inflar los porcentajes de peso del refuerzo debido a la presencia de partículas de refuerzo más duras. Los resultados del microscopio metalúrgico revelaron que había una buena unión intermolecular. También se observa que los composites híbridos más altos con 6% en peso de SiC y 3% en peso de ZrO_2 tenían mejores propiedades que otras combinaciones y se recomienda este AHMMC para el reemplazo de componentes de automóviles.
- En el reciente trabajo de R Ekici et al. publicado en 2022 con el título “Repeated low-velocity impact responses of SiC particle reinforced Al metal-matrix composites”. Se estudiaron los comportamientos repetidos de impacto a baja velocidad de composites de matriz metálica de aluminio 6061 reforzado con SiC para diferentes fracciones de volumen y niveles de energía. Los resultados revelaron que los composites de matriz metálica mostraron un comportamiento más tenaz con un aumento en los números de impacto del 1 al 3, particularmente debido al endurecimiento por deformación. Un aumento en la fracción de volumen del 10 al 30 % dio como resultado un aumento en la resistencia al impacto en todos los impactos repetidos e individuales a pesar de cambiar los mecanismos de deformación y daño debido al aumento del efecto de endurecimiento por

deformación y las fracturas de partículas. El impacto repetido aumentó la dureza de la zona impactada más que el impacto único para todas las fracciones de volumen. Por lo tanto, los composites de matriz metálica pueden comportarse más duro con el efecto de endurecimiento por deformación bajo impactos repetidos.

“Cada vez que surge un nuevo material, surgen nuevas aplicaciones” [31] y en las últimas décadas las partículas metálicas han atraído una amplia atención como candidatos potenciales para reforzamiento, el uso de MMCs es cada vez más extensa, pero la búsqueda de producirlas de manera eficiente y confiable se mantiene continua.

1.6 METODOS DE FABRICACIÓN DE LOS MMC

La forma inicial de la matriz define el tipo de fabricación a utilizar. Las técnicas de producción para los MMC se clasifican básicamente en cuatro tipos [33,36]:

Si la matriz se encuentra en estado líquido el proceso podrá ser:

- Fundición o infiltración de líquidos
- Infiltración a presión
- Fundición centrífuga
- Fundición por agitación
- Formación de spray
- Modelado de Infiltración

En estado sólido se utiliza:

- Pulvimetalurgia (PM)
- Sinterización con presión y baja presión
- Prensado en caliente

En estado semisólido se aplica:

- Agitación electromagnética
- Enfriamiento Controlado y Refinamiento de Grano
- Refundición

En estado gaseoso se puede optar por:

- Deposición de vapor
- Atomización
- Electrodeposición

Cada método de fabricación tiene sus propias ventajas y desventajas, por ejemplo, los métodos en estado líquido ofrecen un proceso de bajo costo como una ventaja única; por otro lado, la dispersión no uniforme de los refuerzos y las reacciones interfaciales no deseadas representan los problemas principales [29-30]. Así como también a cada método de fabricación se le puede dar un diferente enfoque de estudio como: humectabilidad, unión de compositos, corrosión, propiedades mecánicas, eléctricas o térmicas, etc.

En la siguiente tabla podemos observar algunos métodos utilizados a través del tiempo, el enfoque de estudio y componentes del composito.

Tabla 1. Diferentes procesos de fabricación

Proceso de fabricación	Estudio de enfoque	Composito	Referencia
Infiltración	Desgaste Corrosión Propiedades mecánicas	TiC – Mg AZ91 Mg-Al/TiC Mg AZ91E/AlN	L.Falcon-Franco et al. (2010) L. A. Falcon et al. (2011) L. A. Falcon et al. (2015)
Fundición con agitación	Desgaste y corrosión Propiedades mecánicas y desgaste	Al-Mg-Si/RHA-SiC Mg AZ91E/AlN	Alaneme et al. (2014) Arreola C (2016)
Fundición con agitación de dos pasos	Propiedades mecánicas y térmicas Propiedades mecánicas	ZrB ₂ /Si ₃ N ₄ AZ91D/SiC	J. Fayomi et al. (2019) S. Aravindan et al. (2015)
Prensado en caliente	Unión Evolución estructural y propiedades mecánicas	AlMg ₅ / Al ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ /Y ₂ O ₃ / AA 7017	Marc Leparoux et al. (2018) M. Prashanth et al. (2022)
Estado solido	Propiedades mecánicas y térmicas	PP/CB	Metehan Atagur et al. (2020)

De acuerdo con la revisión anterior, se decidió utilizar los métodos que se describen a continuación.

1.6.1 Fundición con agitación

La fundición por agitación es un tipo de proceso de fundición en el que se introduce un agitador mecánico para formar un vórtice para mezclar el refuerzo en el material de la matriz. Es un proceso adecuado para la producción de composites de matriz metálica debido a su rentabilidad, aplicabilidad a la producción en masa, simplicidad, conformación casi neta y control más fácil de la estructura del compuesto.

La configuración de fundición por agitación como se muestra en la figura 12, consta de un horno, alimentador de refuerzo y agitador mecánico. El horno se utiliza para calentar y fundir los materiales. El agitador mecánico se utiliza para formar el vórtice que conduce a la mezcla del material de refuerzo que se introduce en la masa fundida. El agitador consta de la varilla agitadora y sus respectivas aspas. Las aspas pueden ser de varias geometrías y también varios números de palas. Se prefiere la hoja plana con tres aspas, ya que conduce un patrón de flujo axial en el crisol con menos consumo de energía. Este agitador está conectado a los motores de velocidad variable, la velocidad de rotación del agitador está controlada por el regulador adjunto al motor. Además, el alimentador se une al horno y se utiliza para alimentar el polvo de refuerzo en la masa fundida [33,37].

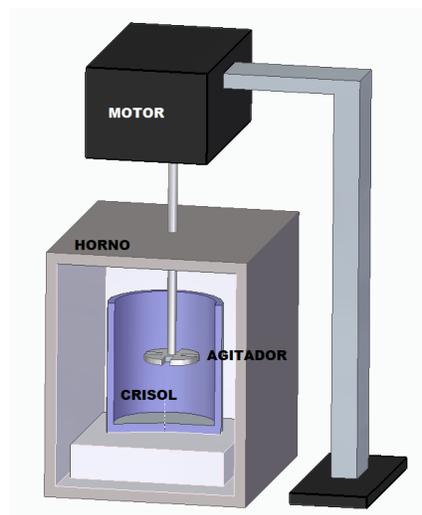


Figura 12. Componentes del equipo utilizado para realizar la fundición por agitación.

1.6.2 Prensado en caliente:

En el prensado en caliente (fig.13), la presión se aplica uniaxialmente a altas temperaturas. El término "alta temperatura" se refiere a una temperatura en la que el componente principal del sistema de aleación se encuentra en el régimen de deformación plástica.

Se puede considerar como dos tipos de procesos de prensado en caliente [38].

- El proceso convencional de prensado en caliente, solo se aplican presión y temperatura.
- El proceso se denomina prensado en caliente inductivo, si la fuente de calor es un horno de inducción.



Figura 13. Método de prensado en caliente

1.7 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE REFUERZO

En la actualidad el desafío más grande para la creación de un material compuesto es la selección de las partículas como refuerzos a utilizar, puesto que no solo tienen un comportamiento mecánico y características diferentes de la matriz, sino que también se procesan de diferentes maneras y han sido clasificadas de acuerdo con su origen, tamaño y procesos de formación.

De acuerdo con su origen, podemos dividirlos en los que se encuentran directamente en la atmósfera y los que se generan en la atmósfera por reacciones químicas a partir de precursores. De acuerdo con el tamaño, los materiales compuestos se clasifican en MMC donde se sabe que el tamaño de sus partículas se encuentra en escala de los micrómetros a diferencia de los NMMC donde se trabaja con nanopartículas y el tamaño de estas oscila de 1 a 100 nm. Los MMC reforzados de forma particulada se han vuelto muy importantes porque son económicos, tienen propiedades relativamente isotrópicas, han demostrado mayor estabilidad térmica y resistencia mecánica y eléctrica y respecto al proceso de formación para los MMC las partículas se pueden distinguir procesos como la nucleación, precipitación y la acumulación [37-40].

Existen diversos factores y características que influyen en la selección y utilización de refuerzos, entre ellos podemos mencionar: Disponibilidad, relación costo beneficio, propiedades mecánicas, superficiales, físicas, características de fabricación y función estética. De estos dependerá también el enfoque de estudio y la posible aplicación.

Como se ha descrito anteriormente, se pretende realizar un material compuesto, donde la matriz metálica será el aluminio, de acuerdo con el análisis de propiedades y características se seleccionaron las siguientes partículas reforzadoras.

1.7.1 Cu₂O

El óxido de cobre (I) u óxido cuproso (**Cu₂O**) es un compuesto **químico** de color rojo o amarillo dependiendo del tamaño de sus partículas. Se ha puesto en la mira por sus propiedades de superconductividad, sus interesantes propiedades foto electrónicas, fotoquímicas, termosolares y electroópticas.

El uso de Cu₂O en dispositivos optoelectrónicos ha ganado impulso recientemente porque es un óxido semiconductor de conductividad natural tipo p entre la gran variedad de óxidos semiconductores y tiene estructura cubica, estructura de bandas directas y ancho de banda de 2.1 eV. Aunque su potencial es notable, el uso de Cu₂O como refuerzo de los AMMCs ha sido poco estudiado debido a que deben considerarse la existencia de vacancias de O₂, la existencia de donores y se puede asociar al predominio de vacancias de oxígeno que presente conductividad tipo n [41-42].

Por ello es necesario realizar estudios adicionales para conocer el comportamiento en sus propiedades eléctricas de un material compuesto de matriz metálica reforzado con este óxido metálico.

Las partículas utilizadas en el presente trabajo cumplen con las características descritas en la tabla 2.

Tabla 2. Características de las partículas de Cu₂O

No. CAS	Partícula	Pureza (%)	SSA (m ² / g)	Densidad (g / cm ³)	Cristal	Color
1317-39-1	30-50 nm	99	54.213	6.012	Cerca de esférica	Rojo

1.7.2 ZrO₂

Las partículas de óxido de circonio (ZrO₂) son una sustancia tecnológicamente significativa con fuerte color natural, alta resistencia, resistencia a la transformación, alta estabilidad química, excelente resistencia a la corrosión y resistencia química.

El uso de este dióxido ha sido muy utilizado en los AMMC, por ejemplo: R Pandiyarajan et al. (2020) en su investigación que lleva por nombre “Investigation mechanical properties of ZrO₂, C and AA6061 metal matrix composites”, crearon un material compuesto, donde la matriz de aluminio fue la aleación 6061, a ella adicionaron ZrO₂ como refuerzo, en cantidades del 2 a 10% en peso, obteniendo un máximo de resistencias obtenidas como 175 MPa en resistencia a la tracción y dureza 45HRB.

En el trabajo “Influence of ZrO₂ nano particles on the behavior of mechanical and tribological properties of the AA7075 composite”, los autores M.S. Prashanth Reddy and H.P. Raj (2020) adicionaron como refuerzos nanopartículas de ZrO₂ a la aleación de aluminio 7075 en proporciones menores a 2% en peso, demostrando que la tasa de desgaste disminuye en todos los casos de carga variable, velocidad y distancia de deslizamiento para diferentes % en peso de adición de refuerzo. Naveen Kumar e Irfan G. (2020) en su investigación nos muestran que el comportamiento tribológico de los compositos de matriz de aluminio reforzado con ZrO₂ ha mejorado el coeficiente de fricción y la resistencia al desgaste y también mejoraron las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción final, la resistencia al impacto, la microdureza, la ligera reducción en ductilidad y tenacidad a la fractura [1].

Las especificaciones de las partículas de óxido de circonio utilizadas en el presente trabajo son las descritas en la tabla 3.

Tabla 3. Características de las partículas de ZrO₂

Fórmula molecular	Densidad molecular:	Tamaño de partícula:	Composición química de ZrO ₂ por porcentaje en peso (%)			
			ZrO ₂	Al	Fe	Pb
ZrO ₂	5,89 g / cm ³	30 nm	99.9 %	<0.06%	<0.02%	<0.02%

1.7.3 Metco™ 43C-NS.

De acuerdo con la ficha técnica presentada por Oerlikon Metco (2014). El uso principal de estos polvos es como un material de recubrimiento de unión pulverizada térmica resistente a la oxidación utilizado bajo una variedad de capas superiores de cerámica pulverizada térmica. Su usos y aplicaciones típicas son como una capa de unión para mejorar la adherencia, como recubrimiento intermedio para mitigar la discordancia del coeficiente de expansión térmica, como una capa de unión resistente a la oxidación y al gas corrosivo, para recubrimientos densos, resistentes a la abrasión y a la oxidación para aplicaciones de salvamento y acumulación, como en sustratos de carbono al carbono y de baja aleación.

Los polvos Metco 43C-NS, también conocido como NiCr 80/20 o Ni 20Cr como películas han demostrado, de acuerdo con el tamaño de espesor, la baja resistividad y un alto coeficiente de temperatura de resistencia, después de tratamientos térmicos la resistividad aumenta [43].

De acuerdo con JIA Qian-qian et al. En su investigación del año 2020, titulada “Reaction Mechanism and Oxidation Resistance of Modified Al/NiCr Composite Coating on T” El Al y NiCr, formaron compositos intermetálicos de Ni₂Al₃ y NiAl con cierto elemento Cr en solución sólida. Además, en toda la zona de reacción de difusión de Al y NiCr, la estructura de la mezcla compuesta por Al líquido, Cr₂O₃ y NiO se dispersa y distribuye. Sin embargo, los compositos intermetálicos de fase Ni₂Al₃ generados tienen el fenómeno

de fusión, y solo los composites intermetálicos de NiAl de alto punto de fusión pueden existir de manera estable.

A continuación (tabla 4), se muestran las características de los polvos utilizados en el presente trabajo:

Tabla 4. Características de las partículas 43C-NS

No. USN	Formula	Tamaño de particular (μm)	Densidad (g / cm^3)	Cristal	Color
N06003	Ni 20Cr	-106 +45	3.1	Irregular, casi esférico	Gris

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA TEÓRICO EXPERIMENTAL

2.1 FABRICACIÓN DE MUESTRAS

De manera general, para llevar a cabo la fabricación de las muestras, fue necesario definir las cargas de la fase continua y discontinua, fundir la matriz y adicionar la cantidad de partículas reforzadoras correspondiente a cada AMMC, agitando vigorosamente y/o aplicando el método de prensado en caliente. Posteriormente se aplicó la técnica de pulido a espejo y ataque químico para poder caracterizar las muestras mecánica, eléctrica y/o morfológicamente.

Es importante recordar que cada una de las etapas debe cumplir con requerimientos especiales para lograr una reproducibilidad en cada muestra elaborada, a continuación, se describe en la figura 14 cada parte el proceso para la síntesis y caracterización de los AMMC.



Figura 14. Proceso general de fabricación de composites

2.1.1 Fabricación de muestras AMMC-ZrO₂ y AMMC-Cu₂O

El proceso de creación de los composites consistió en adicionar 0.15, 0.25 y .050 g de refuerzo a la matriz de aluminio (50 g), mediante el proceso de fundición por agitación (tabla 5). El proceso de agitación se llevó a cabo a una velocidad constante de 450 rpm y un incremento de temperatura de 750 °C a 1020°C. La suspensión compuesta se vertió en un molde de cobre y se moldeó en forma rectangular obteniendo las tres correspondientes a cada adición. Posteriormente se seccionaron en muestras de 1x1x1 cm y se aplicó en ellas la técnica de desbaste y pulido a espejo.

Tabla 5. Condiciones de fabricación de muestras AMMC- ZrO₂ y AMC-Cu₂O

Condiciones de fabricación de muestras AMMC- ZrO₂ y AMC-Cu₂O	
Matriz	Aluminio de alta pureza
Refuerzo	Cu ₂ O
Cantidad de refuerzo	0.15, 0.25 y 0.50 g
Cantidad de matriz	50 g
Método	Proceso de colada por agitación con incremento de temperatura 750° - 1020 ° C

2.1.2 Fabricación de muestras Al- 43C-NS

El proceso de fabricación de los composites (tabla 6) consistió en adicionar 60, 30 y 20 g de refuerzo (43C-NS) a la matriz de aluminio (30 g) mediante el proceso de fundición por agitación. El proceso de agitación se llevó a cabo a una velocidad constante de 450 rpm y un incremento de temperatura de 750 °C a 1020°C. Posterior a esto se realizó el prensado en caliente (7.6 Mpa). Una vez desmoldadas las piezas se cortaron mediante el proceso de chorro de agua. Todas las muestras se llevaron a pulido a espejo para pruebas mecánicas y microestructurales.

Tabla 6. Condiciones de fabricación de muestras

Condiciones de fabricación de 43C-NS	
Matriz	Aluminio
Refuerzo	43C-NS
Cantidad de refuerzo	60, 30, 20 g
Cantidad de matriz	30 g
Método	Agitación con incremento de temperatura 750° - 1020 ° C
	Prensado en caliente (7.6 MPa)

2.2 TÉCNICA DE DESBASTE Y PULIDO

Las etapas de pulido suelen ser, normalmente, un pulido basto con pasta de diamante o alúmina y un pulido final con alúmina. La mayor dificultad que presenta esta técnica es, sin duda alguna, el control de rayaduras en la superficie pulida, pues con el ataque químico se pueden detectar toda una serie de defectos de pulido. Por ello, se recomienda muchas veces la ayuda de la práctica continua y experiencia empleando incluso técnicas de pulido manual.

Para preparar nuestras muestras utilizamos la técnica de pulido manual, para esto es necesario iniciar con un desbaste de lijas de grano grueso (60-240) y continuar hasta lijas de grano fino (600-2000) rotando 90° la pieza cada vez que se cambia de lija, continuando con un pulido de forma circular sobre un paño plural con abrasivo de 3 micras y lubricante tradicional libre de agua basado en etanol. El pulido final se realizó empleando una suspensión de sílice de 0.05 micras. Posteriormente, se verificará en un microscopio óptico la calidad del pulido para repetir la acción si es necesaria para lograr un pulido a espejo.

2.2.2 TÉCNICA DE ATAQUE QUÍMICO

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. Después de una adecuada preparación superficial, la muestra metalográfica debe ser limpiada cuidadosamente para evitar que queden partículas sobre la superficie que puedan interferir posteriormente. Se recomienda limpiar con alcohol la muestra e inmediatamente depositar el reactivo químico sobre la superficie de la muestra pulida. La solución se mueve ligeramente durante el período depósito ataque químico. Durante el ataque se puede apreciar cómo la superficie va cambiando su color pasando a tonalidades. La duración del ataque suele variar entre 20 y 90 s. Durante este intervalo de tiempo, la muestra debe permanecer en una superficie plana para relevar la estructura en la zona deseada, de manera que sea posible controlar el progreso del ataque observando los cambios en la coloración de la superficie.

Una vez concluido el ataque, se enjuaga, en agua, luego en alcohol y, finalmente, se seca, empleando aire caliente. En esta última etapa se podrá apreciar la coloración final y definitiva de la muestra metalográfica, que muchas veces suele diferir bastante de la coloración obtenida en el lapso de los segundos de ataque. Los tiempos para la duración del ataque varían dependiendo de la muestra, de la composición química del material y de su estado microestructural.

2.2.3 REACTIVO QUÍMICO

Se escogen los reactivos para nuestros materiales y se lleva a cabo la técnica de ataque químico.

Tabla 7. Reactivo químico

NOMBRE	COMPOSICIÓN
KELLER (Para Aluminio y sus aleaciones)	2 ml de HF (40%) 3 ml de HCl (38%) 5 ml de HNO ₃ (70%) 190 ml de agua destilada

Nota: En caso de que las condiciones del ataque no fueran las más adecuadas, se volvía a efectuar éste, puliendo previamente la superficie atacada. La superficie atacada químicamente será eliminada fácilmente tras una corta etapa de pulido.

Sólo en casos extremos, donde el ataque fue muy severo produciendo una fuerte disolución selectiva de fases presentes, se hizo necesario efectuar nuevamente la última etapa de desbaste seguido de las etapas de pulido, antes de proceder a un nuevo ataque metalográfico.

2.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE EQUIPO

Para llevar a cabo el presente trabajo fue necesario realizar ciertos diseños de equipos, para lo cual se utilizó el software Solid Edge, el cual, es el único software CAD que permite diseñar de dos formas diferentes. La primera consiste en el modelado ordenado, y la segunda consiste en la tecnología Síncrona (Synchronous Technology en inglés). En esta última se diseña y modifica sin árbol de operaciones, siendo el mismo sistema quien decide los parámetros a modificar.

A continuación, se describen los tres equipos que fueron necesarios diseñar para lograr la realización del presente proyecto.

2.3.1 Crisoles desechables

Se conoce como crisol al recipiente utilizado para fundir un material a temperaturas por arriba de su punto de fusión, de este depende el material del tipo de crisol.

El método final de fabricación de los AMMC reforzados con 43C-NS utilizado fue prensado en caliente, es decir que era imposible verter la carga a un molde, por tal motivo fue necesario diseñar y fabricar crisoles desechables adaptados al pistón y la base de la prensa.

En la siguiente imagen podemos observar el diseño de los crisoles.



Figura 15. a) Diseño de crisol en Solid Edge b) Crisol fabricado.

El material utilizado fue un tubo de acero de 2 pulgadas de donde se obtuvieron los cilindros de 10 cm de alto, posterior a eso se cortaron cuadrados de 5 x 5 cm obtenidos de una placa de acero los cuales fueron soldados como base o tapa del cilindro. Cabe mencionar que se colocaron asas de dimensiones libres que fueron creadas con desechos de alambre recocido y soldadas a algunos crisoles, pero dificultaron la manipulación en el método de prensado, por lo cual se eliminaron para el resto de los crisoles.

Una vez llevado a cabo el método de prensado y enfriado el crisol, fue necesario cortar los crisoles de manera vertical para poder desmoldar la muestra creada, como se observa en la siguiente figura.



Figura 16. a) Corte de crisol. B) Composito completo desmoldado.

A diferencia de los MMCs reforzados con ZrO_2 y Cu_2O este composito fue necesario utilizar una cortadora a base de chorro de agua conocida como Aquacut, debido a la dureza que presento haciendo imposible su corte con una segueta convencional. Finalmente se obtuvieron las muestras con los cortes necesarios, para aplicar en ellos la técnica de desbaste y pulido.

2.3.2 Sistema de circulación de argón

Para evitar un entorno sin riesgo de contaminación de los gases reactivos existentes en el aire, como oxígeno y dióxido de carbono. Se decidió crear una atmosfera inerte, es decir químicamente inactivo, utilizando el gas noble, Argón (No. CAS 7440-37-1). El argón (Ar) es un gas de protección inerte. Utilizado en la industria para prevenir el contacto y la interacción entre el metal líquido y la atmósfera que lo rodea. Se trata del gas protector más utilizado por ser sumamente inerte aún a temperaturas muy elevadas, el Argón se utiliza principalmente en:

- Soldadura en atmósfera de gas inerte (procesos MIG, TIG, plasma).
- Metalurgia y siderurgia, para tratamientos térmicos en atmósfera protectora, desgasificación y desulfuración, etc.
- En electricidad y electrónica, para relleno de ampolletas, tubos fluorescentes, tubos de radio, etc., en los que previene la oxidación de los filamentos incandescentes.
- En laboratorios especializados es utilizado para aplicaciones en cromatografía.

Y sus principales precauciones en manejo y almacenamiento es tener en cuenta que nunca se debe utilizar Argón a alta presión sin saber manejar correctamente cilindros, válvulas, reguladores, etc., se debe utilizar el equipo de protección personal necesario ya que puede causar asfixia por desplazamiento del Oxígeno del aire en espacios reducidos y en el de Argón líquido (LAR), deben tomarse todas las precauciones referentes al manejo de líquidos criogénicos.

Tomando en cuenta lo anterior, se diseñó y fabrico una caja de acero con dimensiones de 10 x 10 x 5 cm con su respectiva tapa, a la cual se le adaptaron dos tubos de cobre, como se muestra en la figura17.



Figura 17. Diseño de caja y fabricación de caja para circulación de Argón.

Se adaptó la caja, al horno de fundición (Mufla), de manera que los tubos salieran y uno funcionara como entrada del argón y otro de salida para lograr la circulación y la atmosfera inerte dentro de la caja, como se observa en la siguiente figura.

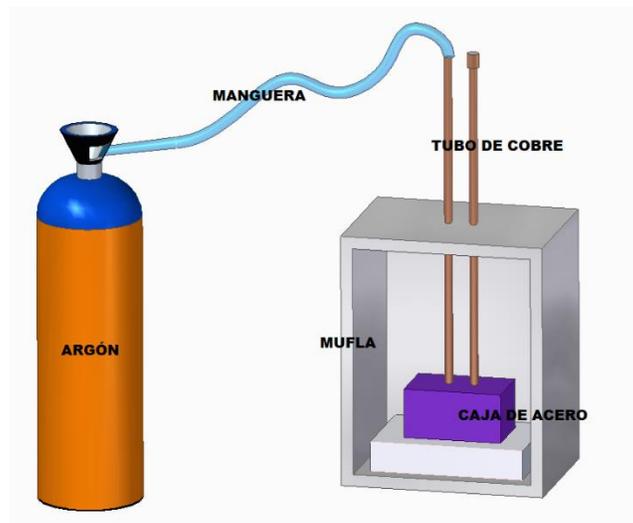


Figura 18. Sistema de circulación de Argón

2.3.3 Equipo de medición eléctrica

Para realizar las pruebas eléctricas de los MMC era necesario cumplir con las siguientes condiciones:

- Ser completamente aislante
- Mantener la mayor precisión y estabilidad
- Tener la facilidad de ajustarse a la fuente de voltaje y al multímetro digital
- Preferentemente moverse verticalmente

Pero la condición más importante es que pueda soportar el peso de un sensor de cuatro puntas como el que se muestra en la siguiente figura.

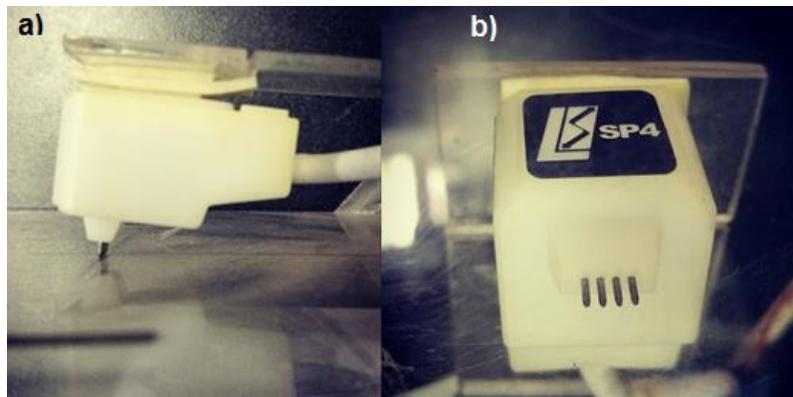


Figura. 19. Dispositivo del método de 4 puntas. a) Vista lateral b) Vista inferior

Por lo cual se optó por diseñar y fabricar el prototipo base de sensor que se muestra en la fig. 21. Para llevarlo a cabo, se siguió la metodología que se presenta a continuación, cabe destacar que el diseño es propio.

Diseño de partes y ensamble en Solid Edge

Se realizaron los dibujos en 2D de las piezas de acuerdo con el bosquejo e idea establecida de creación del diseño, posteriormente se llevaron a un modelado 3D donde se afinaron las medidas y diseño de las partes, como se observa en la siguiente figura.

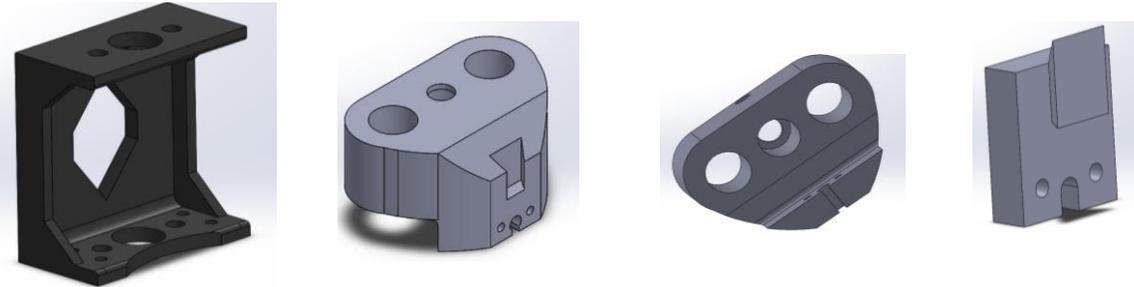


Figura 20. Principales diseños de pieza para prototipo base de sensor.

Se realizó el ensamble de las piezas para verificar uniones y en su caso ajustar los barrenos necesarios, en este punto se decidió no imprimir tres piezas y comprarlas.

Una vez ensamblado se comprobó ocurriera el movimiento vertical propuesto. Se llevó a cabo un análisis de carga y esfuerzo para la unión del sensor y verificar que podría soportar el peso de este y mantener la mayor estabilidad y precisión. Finalmente se logró el siguiente prototipo en 3D.

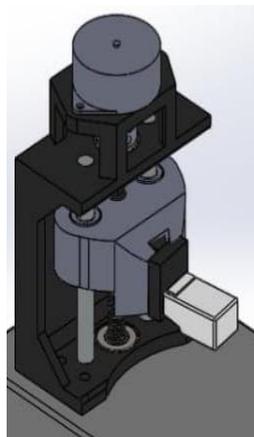


Figura 21. Diseño de prototipo "base de sensor".

Fabricación de prototipo.

La fabricación fue por medio de la impresión 3D en el equipo Ender 3 UV2, se utilizó un polímero bioplástico comercialmente conocido como filamento PLA, el cual mantiene una facilidad de impresión, amplia variedad de colores y estilos, pero sobre todo es amigable con el ambiente.

En la siguiente imagen se puede observar el resultado final del prototipo, donde podemos observar que las piezas que fueron compradas son: una mariposa, un esparrago y tubo de acero inoxidable.



Figura 22. Prototipo impreso de base de sensor.

2.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

2.4.1 Microscopio óptico.

En el microscopio óptico (fig. 23) el aumento del objeto se consigue usando un sistema de lentes que manipula el paso de los rayos de luz entre el objeto y los ojos, para su utilización se recomienda [44]:

1. Colocar el objetivo de menor aumento en posición de empleo y bajar la platina completamente.
2. Colocar el material sobre la platina.
3. Comenzar la observación cuando el objetivo ya está en posición y colocar la lente objetiva el de 10 aumentos (10x).
4. Cambiar de aumento si es necesario y nivelando el tornillo macrométrico para obtener un enfoque detallado y tomar las imágenes correspondientes si son necesarias para una futura utilización.
5. Verificar que la superficie está completamente pulida para realizar la técnica de ataque, en caso de que la pieza observada ya cuente con el ataque se recomienda buscar las zonas donde la estructura han sido reveladas claramente y tomar ciertas imágenes a diferentes aumentos para su estudio.
6. Al finalizar el trabajo, hay que dejar puesto el objetivo de menor aumento en posición de observación, asegurarse de que la parte mecánica de la platina no sobresale del borde de esta y dejarlo cubierto con su funda.



Figura 23. Microscopio Óptico

2.4.2 Microscopio electrónico de barrido (MEB).

Produce imágenes de una muestra mediante un haz de electrones; En la figura 24 podemos observar el funcionamiento del MEB, consiste en la interacción de los electrones con los átomos en la muestra, el haz de electrones generalmente se escanea en un patrón de exploración, y la posición del haz se combina con la señal detectada para producir una imagen de forma que las características más íntimas de la muestra pueden ser examinadas con gran amplificación. Las muestras se pueden observar en alto vacío, en bajo vacío, y en condiciones de humedad.

Un detector formado por lentes basadas en electroimanes, mide la cantidad e intensidad de electrones que devuelve la muestra, siendo capaz de mostrar imágenes en tres dimensiones mediante imagen digital, gracias a su gran profundidad de foco, esta es una de las principales diferencias con las imágenes obtenidas en un microscopio óptico. Su resolución está entre 4 y 20 nm, dependiendo del microscopio.

Todas las muestras deben ser de un tamaño adecuado para caber en la cámara cuyo tamaño depende del microscopio electrónico de barrido a usar. Las muestras deben montarse rígidamente sobre un porta muestras. Varios modelos de MEB pueden examinar cualquier parte con dimensiones de unas 6 pulgadas (15 cm) y algunos pueden inclinar un objeto de ese tamaño a 45 °. Para formación de imágenes de electrones secundarios (SEI, por sus siglas en inglés) en el MEB, las muestras deben ser eléctricamente conductoras, al menos en la superficie, y eléctricamente a tierra para evitar la acumulación de carga electrostática en la superficie. Los objetos metálicos requieren poca preparación especial para su observación en el MEB excepto por la limpieza [45-46].

Para el análisis de nuestras muestras, el pulido a espejo y el ataque del reactivo químico se verifico previamente con el microscopio óptico para posteriormente introducir las muestras al MEB obteniendo imágenes a distintas magnificaciones; con estas imágenes se realizó una caracterización microestructural.

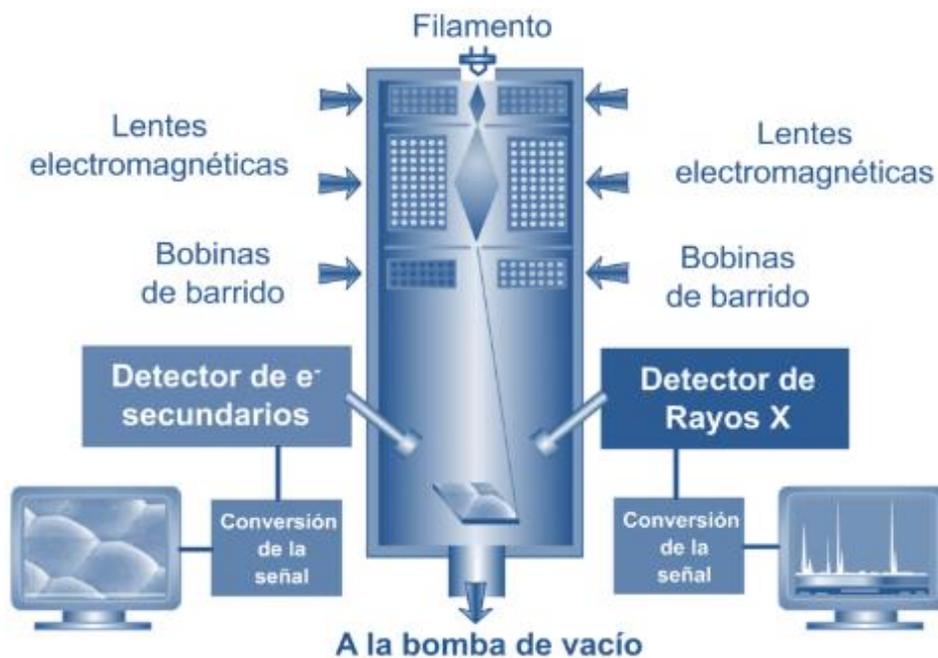


Figura 24. Proceso de funcionamiento del MEB

2.4.3 Técnica de difracción de rayos X

La difracción de rayos X (XRD) es la única técnica de laboratorio no destructiva que revela información estructural, como la composición química, la estructura cristalina, el tamaño de los cristales, la deformación, la orientación preferida y el espesor de las capas. Por lo tanto, los investigadores de materiales utilizan XRD para analizar una amplia gama de materiales, desde polvos y sólidos hasta las películas delgadas y nanomateriales. En la figura 25 podemos observar un equipo básico para llevar a cabo esta técnica.

La difracción de rayos X o cristalografía de rayos X consiste en hacer incidir un haz de rayos X monocromático a través de la muestra cristalina sujeta a estudio. Como consecuencia de la cristalinidad de la muestra, reflejada en las propiedades de simetría de las ordenaciones regulares de los átomos constituyentes, se produce un efecto de interferencia constructiva de las ondas de rayos X dispersadas por cada átomo, teniendo esta interferencia una amplitud máxima para ciertos ángulos de incidencia de la radiación sobre la muestra. La ley de interferencia que relaciona el espaciado entre planos

crystalinos, característico de cada fase, la longitud de onda incidente y el ángulo de dispersión, medido en los difractómetros, es la ley de Bragg.

La ecuación de Bragg, $n\lambda = 2d\sin\theta$ es una de las claves en la comprensión de la difracción de rayos X. En esta ecuación, n es un entero, λ es la longitud de onda característica de los rayos X que incide en la muestra cristalizada, d es la distancia interplanar entre las filas de átomos, y θ es el ángulo del haz de rayos X con respecto a estos planos. Cuando se cumple esta ecuación, los rayos X dispersos por los átomos en el plano de una estructura periódica están en fase y la difracción se produce en la dirección definida por el ángulo θ . En el caso más simple, un experimento de difracción de rayos X consiste en un conjunto de intensidades difractadas y los ángulos en los que se observan. Este patrón de difracción se puede considerar como una huella química, y la identificación química se puede realizar comparando este patrón de difracción con una base de datos de patrones conocidos [47-48].

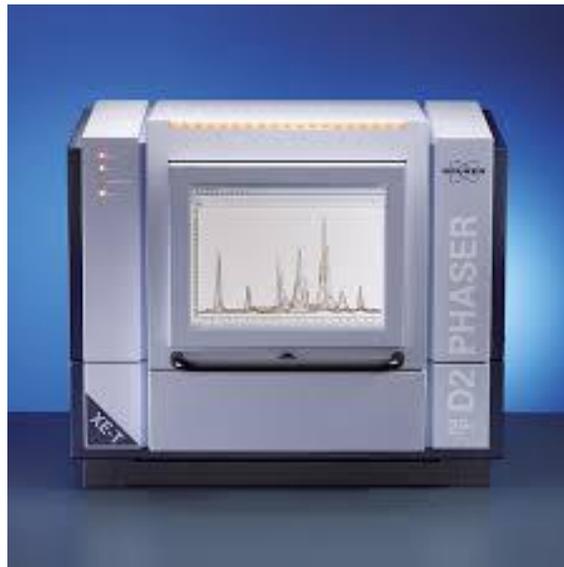


Figura 25. Equipo de difracción de rayos X

2.5 TRATAMIENTOS TERMICOS

Los tratamientos térmicos involucran distintos procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios estructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas. El objetivo de los tratamientos térmicos es proporcionar a los materiales unas propiedades específicas adecuadas para su conformación o uso final. No modifican la composición química de los materiales, pero si otros factores tales como los constituyentes estructurales y la granulometría, y como consecuencia las propiedades mecánicas. Se pueden realizar tratamientos térmicos sobre una parte o la totalidad de la pieza en uno o varios pasos de la secuencia de manufactura. En algunos casos, el tratamiento se aplica antes del proceso de formado (recocido para ablandar el metal y ayudar a formarlo más fácilmente mientras se encuentra caliente). En otros casos, se usa para aliviar los efectos del endurecimiento por deformación. Finalmente, se puede realizar al final de la secuencia de manufactura para lograr resistencia y dureza.

Un tratamiento térmico consta de tres etapas que se presentan a continuación [49-52].

- Calentamiento hasta la temperatura fijada: La elevación de temperatura debe ser uniforme en la pieza.
- Permanencia a la temperatura fijada: Su fin es la completa transformación del constituyente estructural de partida. Puede considerarse suficiente una permanencia de unos 2 minutos por milímetro de espesor.
- Enfriamiento: Este enfriamiento tiene que ser rigurosamente controlado en función del tipo de tratamiento que se realice.

En la tabla 8 podemos observar los parámetros de los tratamientos térmicos a las que fueron sometidas todas las muestras de AMMC y dichos tratamientos se describen a continuación.

Tabla 8. Condiciones de tratamientos

Condiciones de tratamientos de muestras AMMC- ZrO₂ y AMMC- Cu₂O térmicos	
Recocido	300° - 600° C 12 h
Recocido en atmosfera de Argón	600° C 12 h
Temple en aceite y salmuera	500°C 1h
Revenido	260° C 1h
Condiciones de tratamientos térmicos de AMMC- NiCr	
Sinterizado	950 °C 1h
Recocido	300° - 500° C 3 y 5 h
Temple en salmuera	500°C 1h

2.5.1 Recocido

Es un tratamiento térmico que normalmente consiste en calentar un material metálico a temperatura elevada durante largo tiempo, con objeto de bajar la densidad de dislocaciones y, de esta manera, impartir ductilidad.

El recocido se realiza principalmente para:

- Alterar la estructura del material para obtener las propiedades mecánicas deseadas, ablandando el metal y mejorando su maquinabilidad.
- Recristalizar los metales trabajados en frío.
- Para aliviar los esfuerzos residuales.

Las operaciones de recocido se ejecutan algunas veces con el único propósito de aliviar los esfuerzos residuales en la pieza de trabajo causadas por los procesos de formado previo, esto ayuda a reducir la distorsión y las variaciones dimensionales que pueden resultar de otra manera en las partes que fueron sometidas a esfuerzos. Por lo general, al material se le realiza un tratamiento más posterior al recocido con el objetivo de obtener

las características óptimas deseadas [49,52]. En la siguiente figura observamos las muestras listas para que se aplique el tratamiento.



Figura 26. Acomodo de muestras en la mufla para recocido

2.5.2 Temple

El Temple es un tratamiento térmico que tiene por objetivo aumentar la dureza y resistencia mecánica del material, por medio de un enfriamiento brusco (con aceites, agua o salmuera como se observa en la figura 27). En el temple, es muy importante la fase de enfriamiento y la velocidad alta del mismo, además, la temperatura para el calentamiento óptimo debe ser siempre superior a la crítica. Existen varios tipos de temple, clasificados en función del resultado que se quiera obtener y en función de la propiedad que presentan los materiales, llamada templabilidad (capacidad a la penetración del temple), que a su vez depende, fundamentalmente, del diámetro o espesor de la pieza y de la calidad del material [51].



Figura 27. Templado en Aceite y templado en Salmuera

2.5.3 Revenido

Después del temple, los materiales suelen quedar demasiados duros y frágiles para los usos a los cuales están destinados. Lo anterior se puede corregir con el proceso de revenido, que disminuye la dureza y la fragilidad excesiva, sin perder demasiada tenacidad. Este tratamiento térmico consiste en calentar el material (después de haberle realizado un temple o un normalizado) a una temperatura inferior al punto crítico (o temperatura de recristalización), seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretende resultados altos en tenacidad, o lentos, cuando se pretende reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones. Es muy importante aclarar que con la realización del proceso de revenido no se eliminan los efectos del temple, solo se modifican, ya que se consigue disminuir la dureza y tensiones internas para lograr de esta manera aumentar la tenacidad [50-52].

2.5.4 Sinterizado

Es un tratamiento térmico que se hace a los materiales particulados, ya prefabricados, a una temperatura un poco menor a la de fusión para aumentar su resistencia y tener buena manejabilidad de este, ya que los preformados sin sinterizar son muy susceptibles al desvanecimiento porque aún no se ha creado una unión entre las partículas. El resultado del sinterizado es una pieza metálica con una cierta microporosidad, de elevada precisión dimensional, y perfectamente funcional si las características obtenidas se adecúan a las especificaciones del componente [53-54]. En la figura 28 observamos tres piezas de distinto color al inicial, efecto del sinterizado.



Figura 28. Sinterizado de muestras. Se puede observar el cambio de color de las piezas.

2.6 TECNICA DE CARACTERIZACIÓN MECANICA

Esta técnica de caracterización de materiales engloba experimentos de dureza, fatiga, torsión, tracción, compresión y flexión. Se trata de pruebas en las que se aplican fuerzas mecánicas de distinto tipo para comprobar las propiedades de durabilidad y resistencia de las sustancias.

2.6.1 Dureza Vickers (HV)

Se entiende por dureza la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro (indentador o penetrador), el cual no sufre deformaciones residuales en forma y dimensiones.

Para medir la microdureza Vickers es necesario utilizar un microdurómetro (fig.29), este aparato sirve para la medición de microdureza Vickers. Posee incorporado un microscopio de medición, el cual tiene una resolución de 0.001 mm.



Figura 29. Microdurómetro

Este equipo emplea un indentador de diamante en forma de pirámide de cuatro caras con un ángulo de 136° en el vértice, ver Figura 30 (a). Con este se realiza las indentaciones en el material,

La utilización de una pirámide de diamante como indentador tiene las siguientes ventajas:

- Las improntas resultan bien perfiladas y adecuadas para la medición
- La forma de las improntas es geoméricamente semejante como lo muestra la Figura 30 (b).

Por lo cual la dureza para un mismo material es constante, independientemente de la magnitud de una carga P mayor a una P mínima. Por debajo de este valor de carga mínima para un valor de dureza constante, el valor de la microdureza tiende a incrementarse, a cargas muy bajas los materiales parecen más duro.

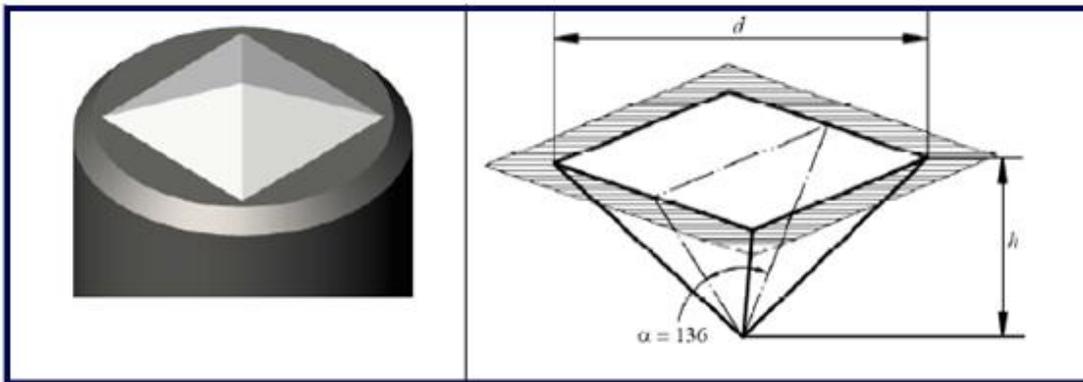


Figura 30. (a) izquierda: indentador de diamante en forma de pirámide, (b) derecho: forma de las improntas

La pirámide se mantiene algún tiempo bajo la carga P . Luego de retirada la carga se mide con la ayuda del microscopio que nuestro Durómetro incluye, las dos diagonales d_1 y d_2 de la huella dejada (fig.31). El valor medio de las diagonales (d_1 y d_2) y el valor de la carga se sustituyen en la fórmula de trabajo $HV = 1.8544 P/d^2$ [55] o se obtiene directo de tablas para obtener el valor de la microdureza Vickers. En las mismas condiciones se realizan las indentaciones necesarias en una zona de estudio para realizar un perfil de dureza [56].

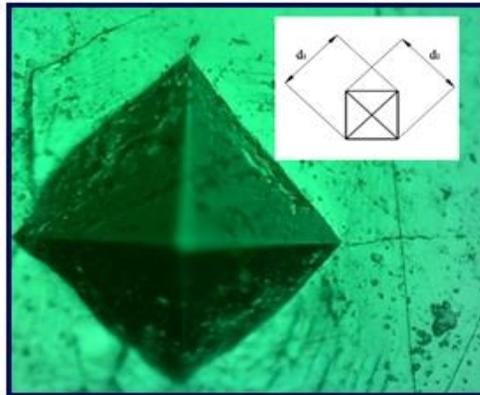


Figura 31. Identificación

2.7 TECNICA DE CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA

Se estudiaron dos propiedades eléctricas en los AMC, la resistividad y la conductividad, para lograrlo se tuvo que realizar un prototipo descrito en el capítulo anterior y se adaptó para conectarlo a una fuente de corriente de 5 Amperes, multímetro digital RIGOL y un sensor de cuatro puntas. El resultado obtenido fue la resistencia de cada AMC, como se observa en la figura 32, con este valor se calculó la resistividad del material y posterior a eso de aplico su inverso para obtener la conductividad.

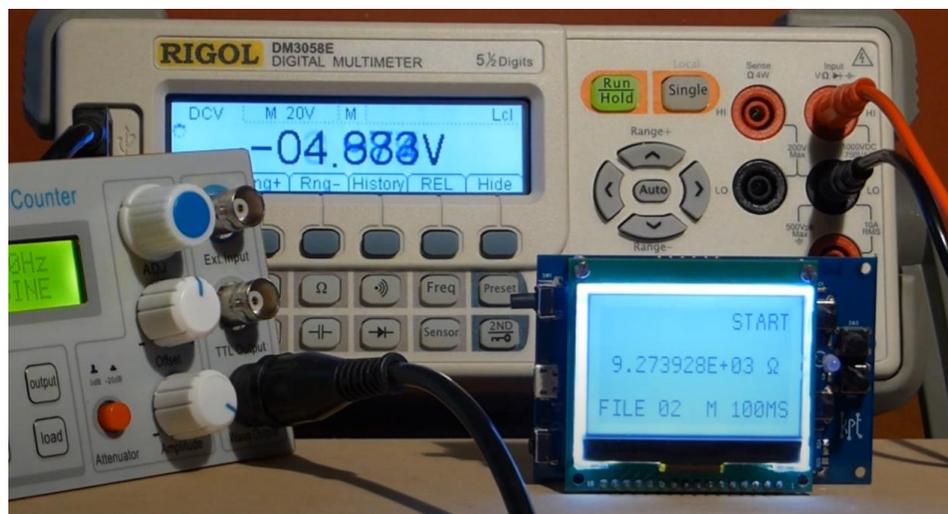


Figura 32. Arreglo para pruebas eléctricas

2.7.1 Resistividad

La resistividad eléctrica de un material describe de manera cuantitativa cómo un material resiste el flujo de la electricidad. Para estudiar la resistividad de los materiales compósitos se ha empleado la técnica de medición de los cuatro puntos o técnica de Van der Pauw (fig.33). Esta técnica presenta como ventaja el empleo de muestras pequeñas y, por lo tanto, más homogénea, sin una geometría determinada, necesitando solo cuatro contactos. Debido a lo anterior, nuestras muestras se ajustan a este tipo de técnica de medición [57].

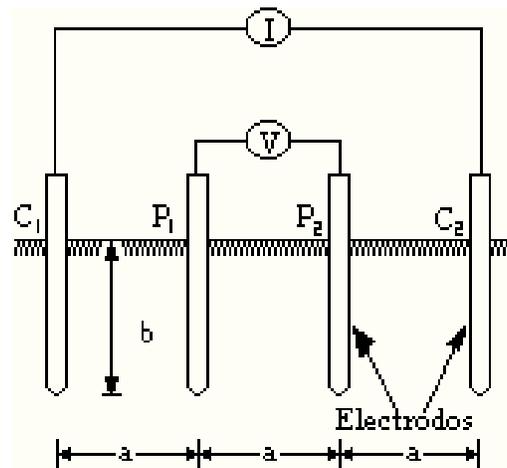


Figura 33. Medición 4 puntas.

2.7.1 Conductividad

La conductividad eléctrica indicada por el símbolo (σ) es la capacidad de conducir corriente eléctrica cuando se aplica una diferencia de potencial, es una de las propiedades físicas más importantes en un semiconductor o un sólido. En una muestra de MMC la conductividad dependerá de la concentración de las partículas reforzadoras y la movilidad de los portadores de carga [58].

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo presentaremos los resultados obtenidos del análisis de datos que surgieron del proceso de experimentación, es decir la creación de tres distintos compositos cada uno de ellos con una variación de distintos porcentajes en peso, los cuales fueron sometidos a sus respectivas pruebas de caracterización. Estos resultados mostraran la mejora general que consigue la gran parte de los compositos realizados, así como se destacan las posibles variables que han influido significativamente en la mejora de estos, ofreciendo las posibles razones que han podido dar lugar a dichos resultados.

3.1 MATERIAL COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMINIO REFORZADO CON PARTÍCULAS DE ZRO₂

El proceso de creación de los compositos consistió en adicionar 0.15, 0.25 y 0.50 g de refuerzo (ZrO₂) a la matriz de aluminio (50 g) mediante el proceso de fundición por agitación. El proceso de agitación se llevó a cabo a una velocidad constante de 450 rpm y un incremento de temperatura de 750 °C a 1020°C. La suspensión compuesta se vertió en un molde de cobre y se moldeó en forma rectangular obteniendo las tres correspondientes a cada adición. Se clasificaron como C1 (muestras base). Posteriormente se seccionaron en muestras de 1x1x1 cm para las pruebas. Se realizó el recocido de todas las muestras a temperaturas de 300 °C – 600 °C por 12 h. Para el recocido en atmosfera de argón se fabricó y diseñó un prisma rectangular de lámina de acero, la cual se adaptó al horno donde el Argón estuvo en recirculación durante las 12 h a 600 °C. Los temple se llevaron a cabo a una temperatura de 500 °C por 1 para el de salmuera se alcanzó una temperatura de -15 °C. Para el templado en aceite se utilizó Aceite IBERTEM MS 50 de media velocidad de enfriamiento, finalmente se les realizó un revenido a 260°C durante 1 h. Todas las muestras se clasificaron de acuerdo con la siguiente tabla, con la terminación de la distinta adición.

Tabla 9. Nomenclatura de muestras realizadas.

C2	Recocido
C3	Recocido en atmosfera de argón
C4	Templadas en aceite
C5	Templadas en salmuera
C6	Revenido templado en aceite
C7	Revenido templado en salmuera

3.1.1 Caracterización Microestructural

Las micrografías para porcentajes variables de óxidos muestran que la adición de partículas durante el proceso de solidificación actúa como centros de nucleación sobre las que se solidifican los granos de aluminio. Se observa en la figura 34. la adición de partículas de ZrO_2 inducen a la modificación de la estructura dendrítica, la reducción y refinamiento de grano y también algunos pequeños aglomerados. Las imágenes microscópicas han revelado que la distribución de ZrO_2 en aluminio es uniforme con precipitación interdendrítica.

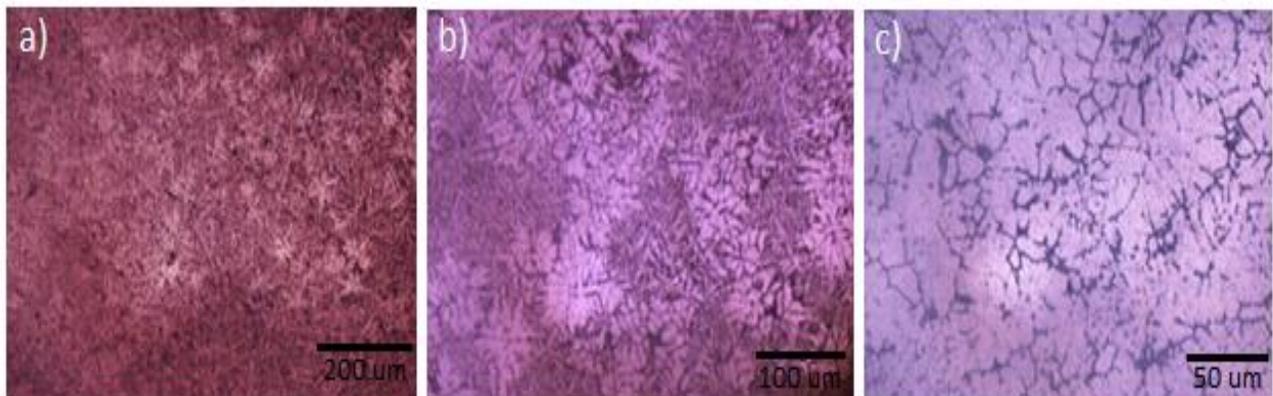


Figura 34. Micrografías ópticas de Composite Al- ZrO_2 con diferentes composiciones.

a) Comportamiento dendrítico. b) Dendrita refinada. c) Granos equiaxiados.

3.1.1.1 Difracción de Rayos X

XRD, por sus siglas en inglés, es una técnica utilizada para identificar las diferentes fases, determinación del tamaño cristalino y de partícula. En la figura 35 se presentan los picos de difracción de rayos X para el compuesto preparado para diferentes refuerzos. Los principales picos intensos para el Al y ZrO_2 se observan en todos los patrones XRD en 2 theta igual a 38° , 45° , 65° . La adición de el refuerzo también conduce a la formación de muchos compositos intermetálicos como el Al_2O_3 o bien se puede atribuir al enfriamiento de las muestras después del tratamiento térmico.

De acuerdo con el diagrama de fase binario Al-Zr, existen hasta ocho compositos intermetálicos. De acuerdo con J. Murray et al. existen diez fases intermetálicos estables que son: Zr_3Al , Zr_2Al , Zr_5Al_3 , Zr_3Al_2 , Zr_4Al_3 , Zr_5Al_4 , $ZrAl$, Zr_2Al_3 , $ZrAl_2$ y $ZrAl_3$ [59-62]. Este último se presenta en los patrones XRD del composito de Al- ZrO_2 , se puede esperar que sea una fase menor estable formada. Después de los recocidos en diferente atmosfera los patrones de XRD mostraron la formación de estos compositos: $ZrAl_3$ y Al_2O_3 , pero en cantidades menores. Existen pequeños picos que pueden atribuirse a impurezas presentes en la muestra. Las intensidades relativas aproximadas corresponden a reacciones exotérmicas.

Se midió el porcentaje promedio del ancho a mitad de altura (FWHM) de los picos característicos, para cada uno de los compositos y los diferentes tratamientos térmicos. En la figura 36 inciso a) y b) se observa el porcentaje del ancho de los picos los cuales muestran que a mayor cantidad de dopante da como resultado mayor cantidad de Al_2O_3 , después del tratamiento térmico $ZrAl_3$ muestra un incremento para las muestras C2-0.15 y C2-0.50, pero finalmente todos los resultados disminuyen al 50% cuando los recocidos se realizan con cambio de atmosfera, impidiendo la formación no solo del oxido sino también de la fase $ZrAl_3$, manteniendo una dureza menor al recocido.

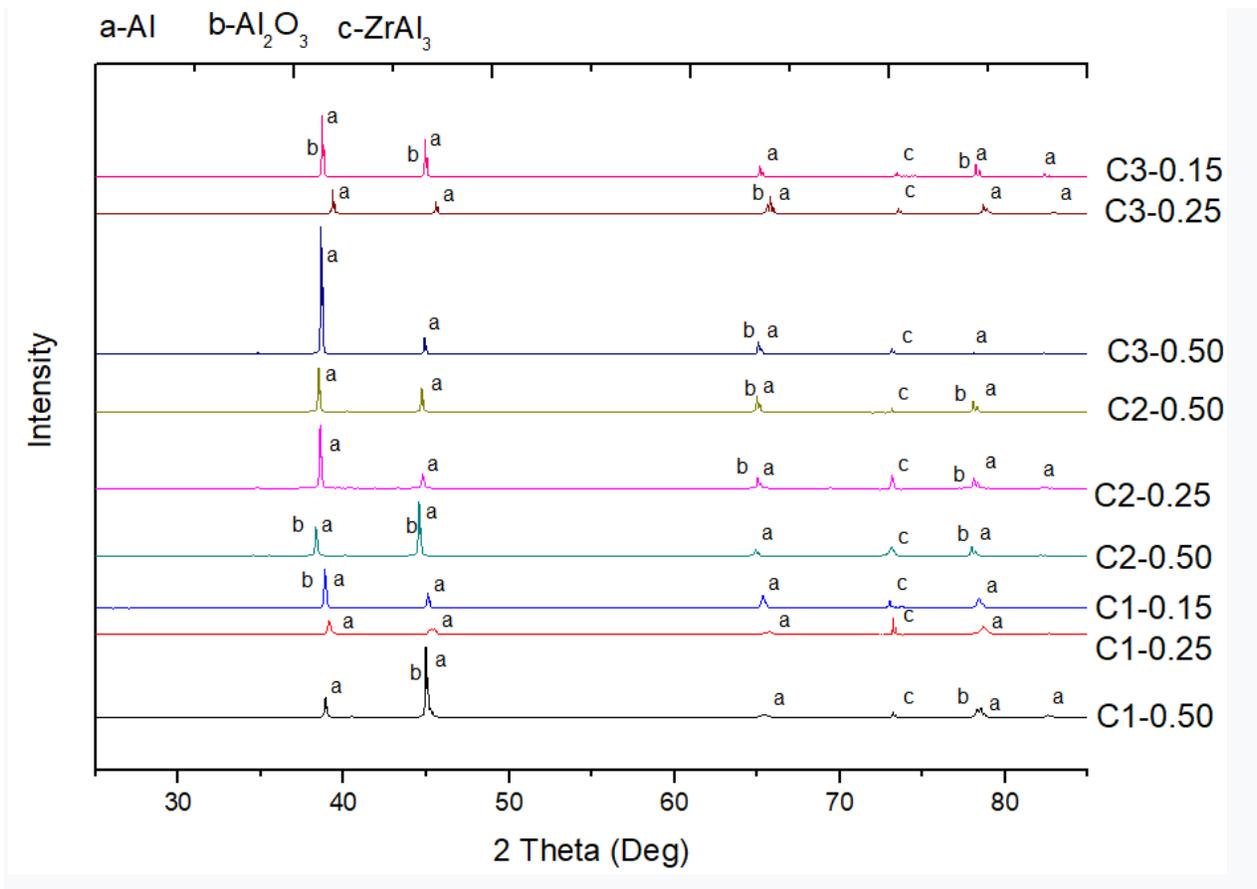


Figura 35. Picos de difracción de rayos X para el material compuesto preparado para diferente peso.

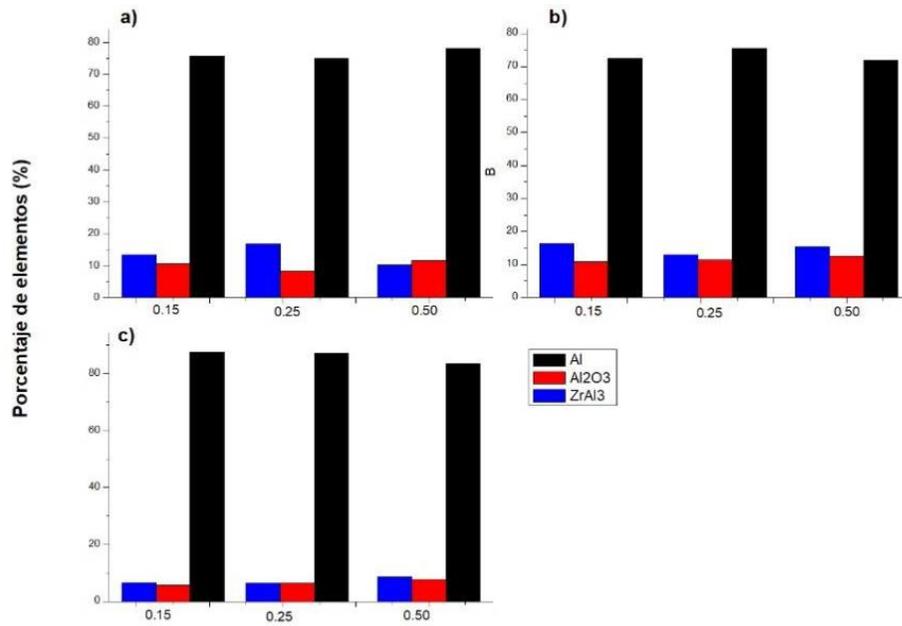


Figura 36. FWHM de los diferentes compositos. a) C1 b) C2 c) C3

3.1.2 Caracterización Mecánica

3.1.2.1 Dureza Vickers inicial de compositos

La medición del nivel de fortalecimiento del composito se realizó utilizando el método tradicional de dureza Vickers (HV) en las superficies de los cubos que se prepararon adecuadamente para la caracterización microestructural, buscando una zona adecuado para realizar las indentaciones ya que para materiales compositos de matriz blanda y reforzada con partículas duras, la selección de la región en la muestra donde son evaluados los datos de dureza es crítico ya que la fase de refuerzo, debe evitarse. En la tabla 10 se observan los resultados obtenidos de los valores promedio de dureza a partir de las indentaciones realizadas, el tamaño promedio de grano obtenido por medio del microscopio óptico y el tamaño promedio de cristalita de acuerdo con los datos obtenidos de difracción de rayos X, se comprueba que la fluctuación de dureza es inversamente proporcional al tamaño promedio de cristal. Se observa una disminución repentina de dureza para la muestra C1-0.50, este comportamiento se atribuye a la baja densidad de las partículas que flotan en la masa fundida, lo que conduce a una distribución no uniforme y débil unión interfacial entre la matriz y las partículas, dando lugar al aumento en la deformación plástica.

Tabla 10. Composición química de ZrO₂ por porcentaje en peso

TAMAÑO PROMEDIO TOTAL (nm)			Dureza (HV)
Muestra	Rayos X	Óptico	
C1-0.15	19.19	18.64	60.26
C1-0.25	19.92	19.26	62.93
C1-0.50	25.16	26.56	54.12

3.1.2.2. Fluctuación de Dureza Vickers después de tratamientos térmicos

Las muestras C2, son aquellas a las que se les realizó un recocido a cuatro diferentes temperaturas por 12 h, en la figura 37 se puede observar un típico comportamiento de una curva de temperatura, a mayor temperatura mayor es la deformación plástica para todas las aleaciones. De cero a 300 °C para las muestras C2-0.50 y C2-0.25 existe un régimen de endurecimiento, siendo esta temperatura, el pico máximo de dureza encontrada en todo el estudio, equivalente a 81.78 HV y 73.07 HV respectivamente. Conforme la temperatura aumenta se observa la disminución repentina de la dureza para las muestras C2-400 °C y para las C2- 500 °C el proceso inicia un equilibrio alcanzándolo en aproximadamente 520 °C y posteriormente la tensión del rendimiento caerá constante para los tres compositos.

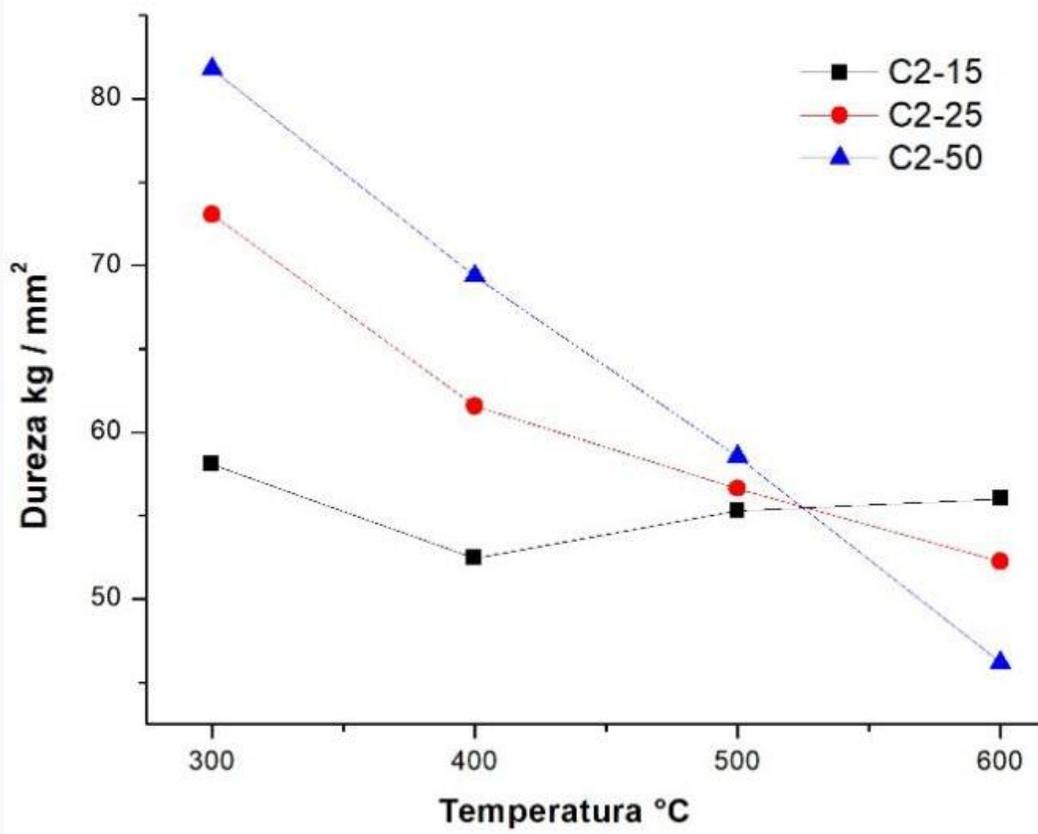


Figura 37. Dureza Vickers de muestras después de tratamientos térmicos.

3.1.2.3 Fluctuación de Dureza Vickers con cambio de atmosfera

El recocido bajo atmósfera de argón como gas inerte reduce y permite controlar la presencia de cantidad de oxígeno para evitar o minimizar la oxidación superficial o la formación de compósitos. En este caso las muestras minimizaron la formación de $ZrAl_3$ y Al_2O_3 para los tres compósitos de las muestras C3 como se observa en la figura 36 c). El tratamiento se realizó a $600\text{ }^\circ\text{C}$ donde se alcanza el comportamiento constante para los tres compósitos, de acuerdo con la figura 38. Las muestras C3-0.15 y C3-0.25 disminuyen su dureza, esto se atribuye a la pequeña cantidad de óxidos formados respecto de las muestras C2. La muestra C3-0.50 incrementa $\pm 6\text{ HV}$ respecto de la muestra C2-0.50 esto se atribuye al aumento de densidad y distribución de partículas más pequeñas de ZrO_2 en la fase de la matriz.

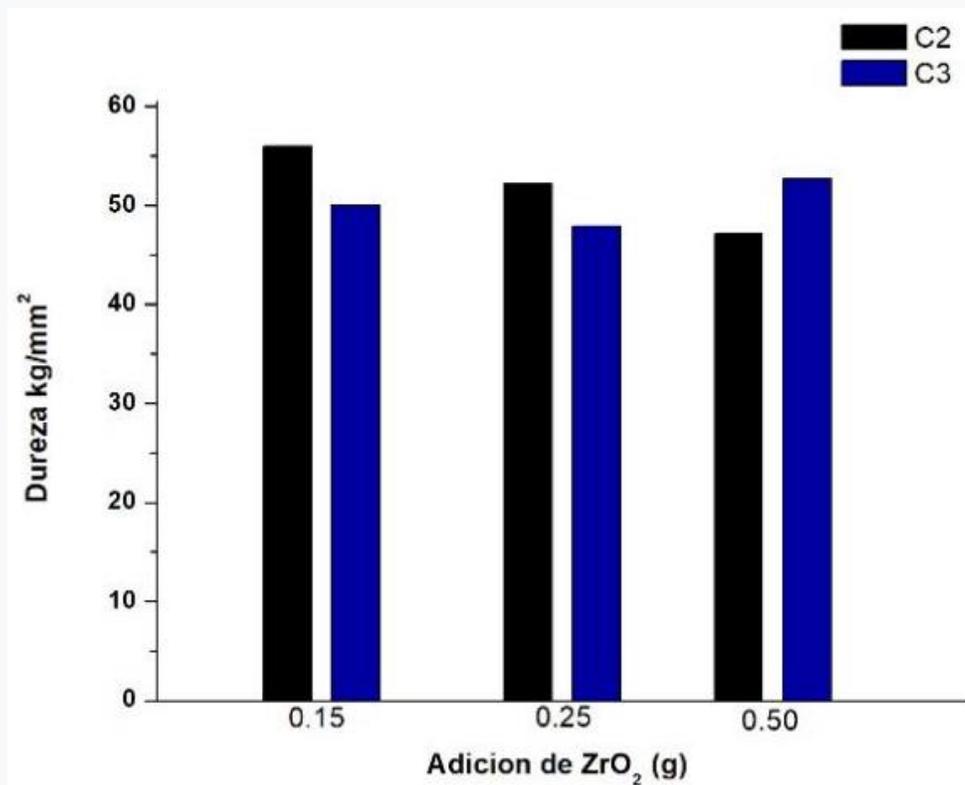


Figura 38. Fluctuación de dureza con cambio de atmosfera vs. Recocido normal.

3.1.2.4 Fluctuación de dureza después de Temple en salmuera y Aceite

Las muestras templadas en salmuera (C5) y que posteriormente fueron revenidas (C-7), mostraron el mismo comportamiento, a mayor adición de ZrO_2 mayor incremento de dureza siendo una diferencia entre ellos de ± 2.5 HV como se observa en la figura 39. Los compositos templados en aceite son los que obtuvieron la menor dureza de esta etapa de temple, C4-0.15 y C4-0.25 incrementaron su dureza después del revenido ± 2.7 HV, pero la muestra C4-0.50 solo pudo incrementar ± 0.7 HV.

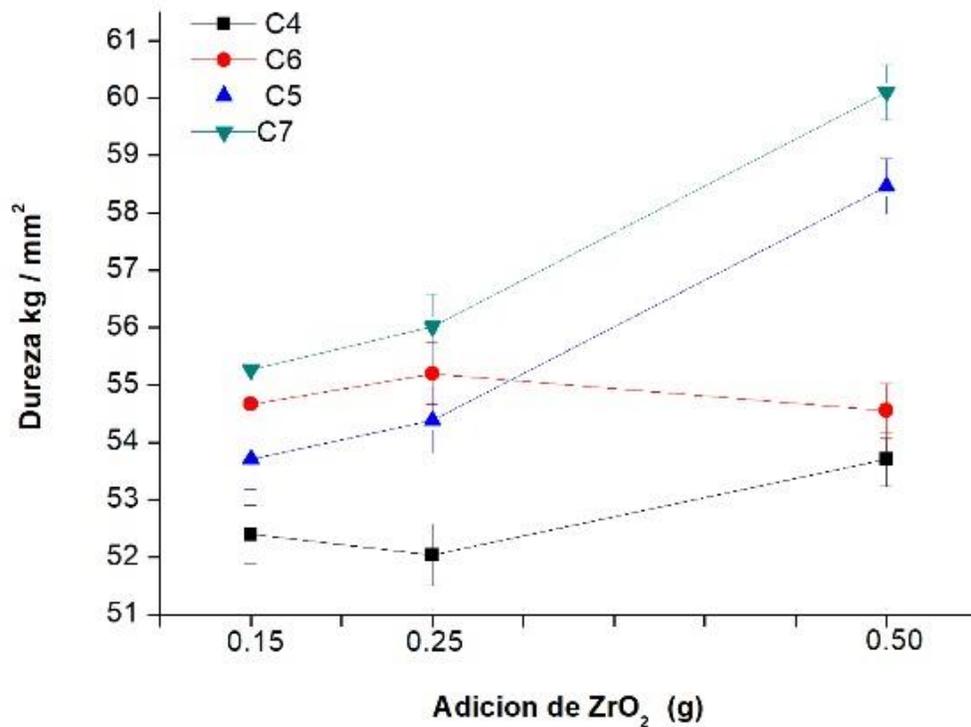


Figura 39. Dureza Vickers de temple y revenidos.

3.1.2.5 Fluctuación de dureza de todos los compositos.

En la figura 40 podemos observar el comportamiento de cada uno de los compositos donde para los tres es similar. Reforzar la matriz de aluminio con distintas cantidades de ZrO_2 en combinación con los diferentes tratamientos dio como resultado obtener una mejora en promedio de 43% por encima de la dureza del aluminio puro. Las durezas máximas mostradas en esta figura corresponden a 61.26 HV y 60.1 HV para la muestra C1-0.15 y C7-0.50 respectivamente. Siendo las mínimas 47.12 para C2-0.50 y 47.92 para C3-0.25, el resto ronda entre 50 a 59 HV.

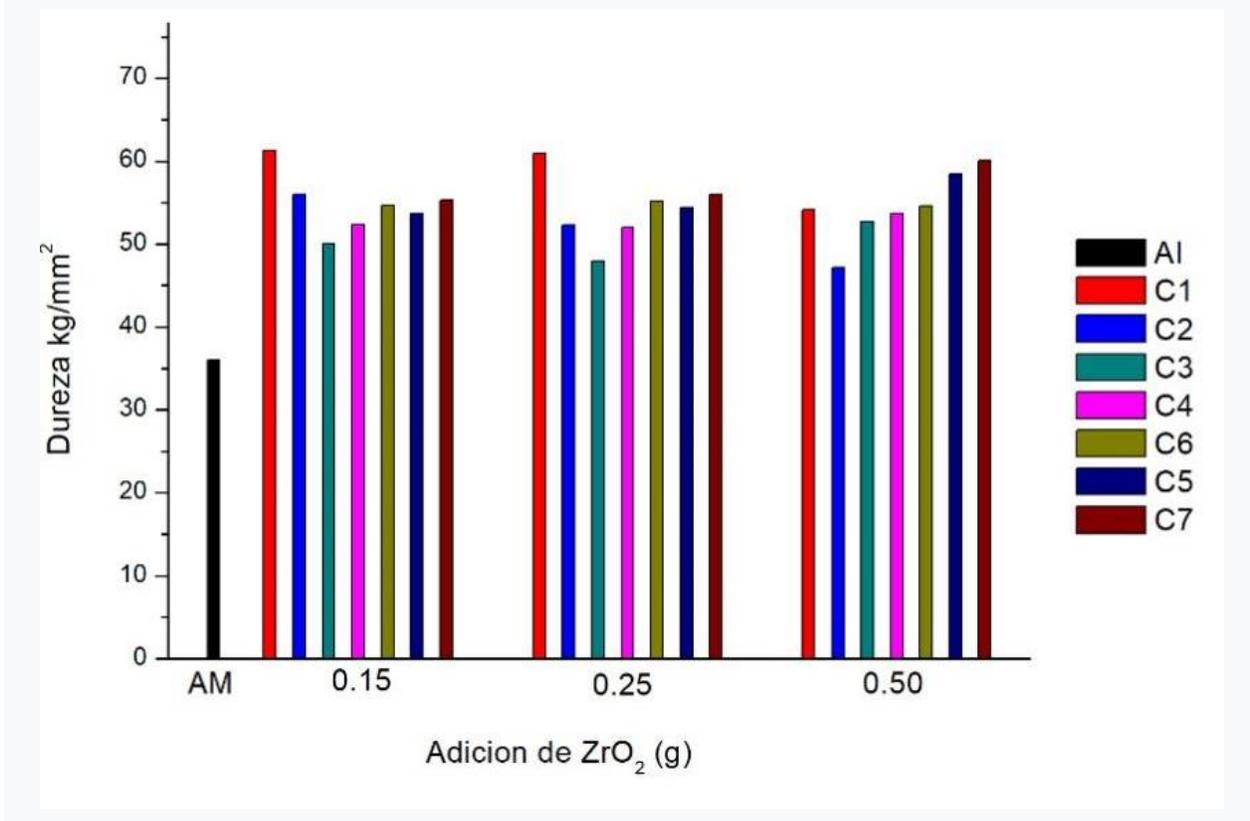


Figura 40. Dureza Vickers de compositos.

3.1.3 Caracterización eléctrica

La resistividad es una propiedad volumétrica e intrínseca del material, indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas y es función de la temperatura, de la composición y de la microestructura del material en cuestión [63]. Por ello, se puede pensar en que la resistividad eléctrica tiene una conexión directa con la cantidad de impurezas y defectos presentes en el material. Teniendo en cuenta que en su movimiento por el material las cargas eléctricas colisionan con el entorno, a mayor número de defectos, menor distancia entre colisiones y menor movilidad, lo que se traduce en una disminución de la conductividad eléctrica y por tanto un aumento de la resistividad eléctrica. En la figura 41. Podemos observar el comportamiento de la resistividad eléctrica para todas las muestras realizadas. Aparentemente tenemos dos mecanismos presentes que afectan la resistividad, el primero se atribuye con la cantidad de Al_2O_3 y ZrAl_3 formado que sirven de barrera de difusión al transporte de iones y el segundo se ha correlacionado con la dureza en todos los casos y se ha observado que los materiales que manifiestan mayor dureza exhiben menor resistividad.

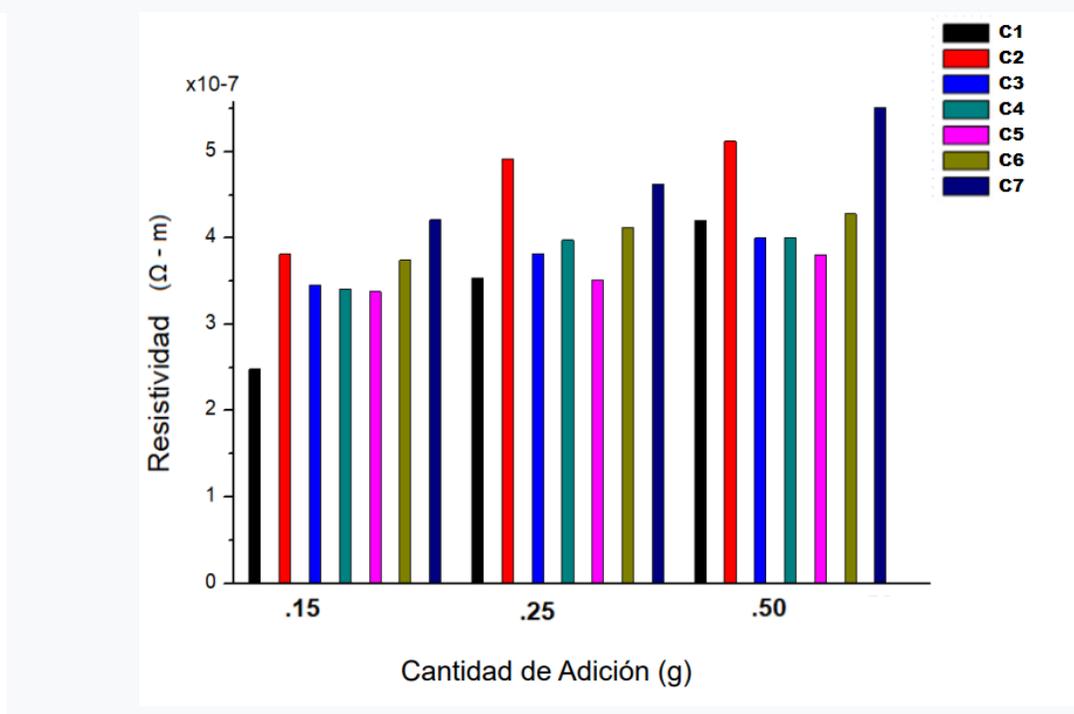


Figura 41. Resistividad eléctrica de compositos.

3.2 MATERIAL COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMINIO REFORZADO CON PARTÍCULAS DE Cu_2O

Se utilizó Aluminio al 99.5 % como material matriz y se adiciono 0.15, 0.25 y 0.50 g de partículas de Cu_2O como componentes de refuerzo. Para la fabricación, se cargaron 50 g de aleación de Al en un horno de resistencia, se añadió la cantidad apropiada de óxido en la aleación fundida seguida de agitación vigorosa. La suspensión compuesta se vertió en un molde de cobre y se moldeo en forma rectangular. Para estudiar la microestructura, se cortaron muestras de 1x1x1 cm, llevando una cara a pulido espejo con pasta de Alúmina y posteriormente utilizando el reactivo de ataque químico Dix–Keller para revelar su microestructura.

Se realizo el recocido de todas las muestras a temperaturas de 300 °C – 600 °C por 12 h. Para el recocido en atmósfera de argón se fabricó y diseño un prisma rectangular de lámina de acero, la cual se adaptó al horno donde el Argón estuvo en recirculación durante las 12 h a 600 °C. Los temples se llevaron a cabo a una temperatura de 500 °C por 1 h para el de salmuera se alcanzó una temperatura de -15 °C. Para el templado en aceite se utilizó Aceite IBERTEM MS 50 de media velocidad de enfriamiento, finalmente se les realizo un revenido a 260°C durante 1 h. Todas las muestras se clasificaron de acuerdo con la tabla 11, con la terminación de la distinta adición.

3.2.1 Caracterización microestructural

Se observa en la figura 42, las microestructuras para muestras con Aluminio más diferentes adiciones de Cu_2O , donde en la figura 42 (a) se observa un comportamiento dendrítico con adiciones de 0.15 g de Cu_2O , siendo el tamaño de la dendrita de aproximadamente 45 μm . Para el caso de la muestra con 0.25 g de adiciones de Cu_2O en la figura 42 (b) se puede observar un comportamiento dendrítico, donde las dendritas presentan un agrandamiento en su estructura siendo el tamaño dendrítico de 90 μm en promedio. Por otro lado, para la muestra con 0.50 g se puede observar su microestructura en la figura 42 (c) que existe una

Evolución de la estructura dendrítica a granos equiaxiales. Por lo tanto, el efecto de las adiciones de óxido se observa claramente para las tres composiciones diferentes donde los óxidos de cobre promueven el crecimiento del grano [64]. Las variaciones microestructurales se explican considerando que las adiciones de óxidos pueden inducir la modificación de la estructura dendrítica y el crecimiento de los granos bajo el mecanismo de que las partículas durante el proceso de solidificación actúan como puntos de nucleación sobre los cuales se solidifican los granos de aluminio [65-67].

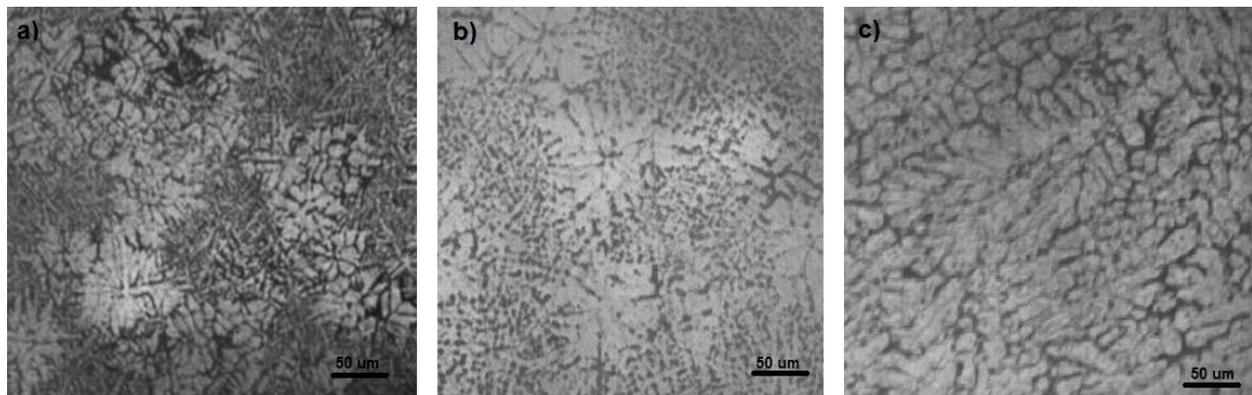


Figura 42. Micrografías ópticas de las estructuras de aleaciones con diferentes composiciones. (a) 0.15 g. (b) 0.25 g (c) 0.50 g.

3.2.1.1 X-ray diffraction (XRD)

Para obtener información de las fases presentes se realizaron análisis de XRD, así como para determinar el tamaño promedio de cristalita en las muestras. Para el estudio de la fluctuación de dureza vickers se utilizaron cargas de 0.1 kgf con tiempo de 15 s según ASTM: E384 estándar y se realizaron distintos tratamientos térmicos en el equipo AR-340. Para el estudio de las propiedades eléctricas se diseñó y fabricó una estructura para soportar un sensor de cuatro puntas y poder obtener los resultados. Se obtuvo un total de 21 muestras a las cuales se asignó la nomenclatura descrita en la tabla 11.

Tabla 11. Nomenclatura de muestras realizadas.

Código	Descripción	Con adición de:
AM	Matriz de Aluminio	
BA	Aleaciones base	0.15, 0.25 y 0.50 g
AA	Aleaciones con recocido	
AAA	Aleaciones con recocido en atmosfera de argón	
ATA	Aleaciones templadas en aceite	
ATS	Aleaciones templadas en salmuera	
ARTA	Aleaciones con revenido templado en aceite	
ARTS	Aleaciones con revenido templado en salmuera	

Los patrones XRD obtenidos para la matriz de Al observado en la figura 43. Comprueban la pureza de este y muestran un porcentaje promedio de AlO_2 igual a 6.3% de ancho de rayo, creado después del recocido a $600^\circ C$ en distinta atmósfera.

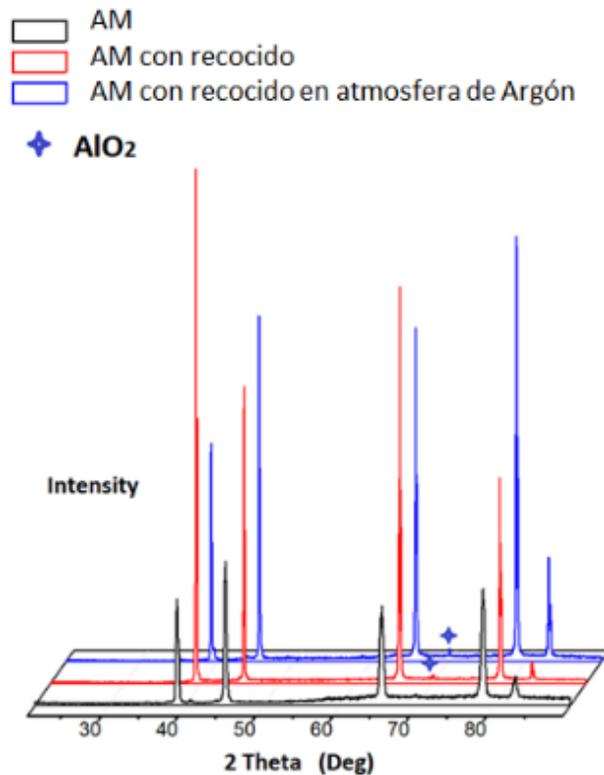


Figura 43. Patrón de difracción de rayos X de matriz de aluminio expuesta a recocidos.

Se obtuvieron los patrones de difracción de rayos X para todos los composites expuestas a los diferentes recocidos y a la atmosfera de argón. En la figura 44 a) se observa que el proceso de fundición genera dos tipos de óxidos; CuO y Al₂O₃. Al ser expuestas a los recocidos (figura 44 b) se genera Al₂CuO₄. Finalmente, como se observa en la Fig. 44 c) El cambio de atmósfera en los tratamientos térmicos posibilita la creación de nuevos óxidos metálicos en cantidades muy pequeñas como: Al₂O₃, Al₂O₃ [66].

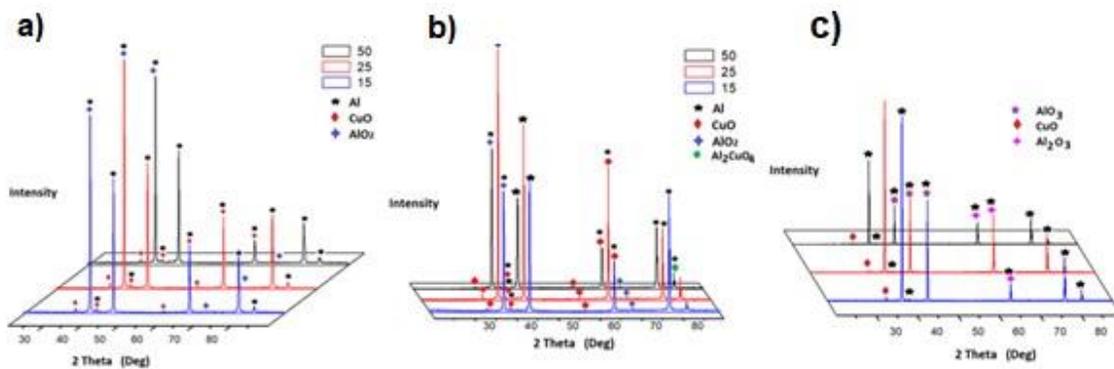


Figura 44. Patrón de difracción de rayos X de muestras BA, AA y AAA con sus respectivas adiciones.

Se determino el tamaño de las partículas obtenidas a partir del espectro de difracción de rayos X midiendo el porcentaje promedio del ancho a mitad de altura (FWHM) de los picos característicos, para cada una de las aleaciones reforzadas con CuO₂ y los diferentes tratamientos térmicos. En la figura 45 se observa el porcentaje del ancho de los picos correspondientes a cada una de las muestras; para los composites base (BA) se observó que a mayor cantidad de dopante da como resultado mayores cantidades de óxidos intermetálicos.

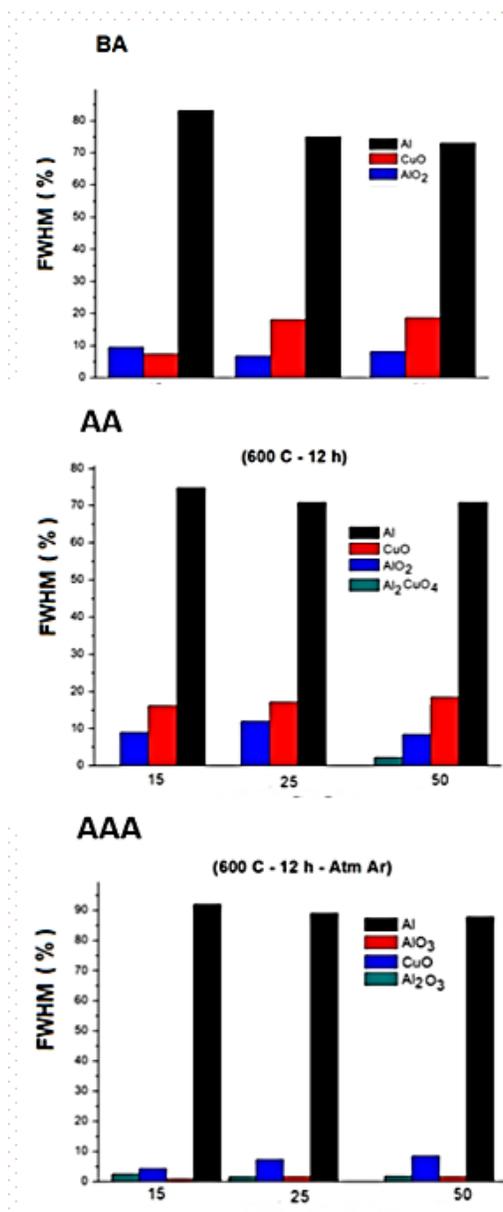


Figura 45. Porcentaje de ancho de picos de distintas aleaciones.

Después de un recocido por 12 h los óxidos mantienen el mismo comportamiento y en la muestra AA 0.50 se genera menor cantidad de AlO₂, pero se muestra un pico correspondiente al tetraóxido de cobre y dialuminio con un ancho de 2.10% el cual se atribuye a la cantidad de dopante que existe en esa aleación [68]. El recocido en atmósfera de argón disminuye la creación de óxidos intermetálicos en todas las aleaciones; en comparación a las BA el CuO₂ disminuye para la aleación AAA 0.15 un 40.33%, AAA 0.25 un 58.94% y AAA 0.50 un 54.28% y para el AlO₂ 90.08 %, 75.32% y

79.41% respectivamente. Los datos anteriores nos permitieron obtener como resultado los tamaños promedio de cristalita calculados para cada aleación comprobando que la fluctuación de dureza es inversamente proporcional al tamaño promedio de cristal, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 12. Nomenclatura de muestras realizadas.

TAMAÑO PROMEDIO DE CRISTALITA (nm)					
	AlO₂	CuO	Al	Al₂CuO₄	Al₂O₃
BA15	10.03	27.5	30.42		
BA25	17.85	31.63	29.15		
BA50	12.04	37.1	23.35		
AA15	27.95	37.46	33.77		
AA25	28.96	36.07	30.11		
AA50	27.79	44.49	39.46	18.79	
AAA15	6.01	39.72	69.14		8.79
AAA25	12.72	40.03	54.5		12.03
AAA50	16.68	42.01	48.91		13.85

3.2.2 Caracterización Mecánica

3.2.2.1 Dureza Vickers (HV)

Para materiales composites de matriz blanda y reforzada con partículas duras, la selección de la región en la muestra donde son evaluados los datos de dureza es crítico ya que la fase de refuerzo debe evitarse.

Las pruebas de dureza se realizaron en el equipo Leco 300 MT. Se obtienen los valores promedio de dureza a partir de las indentaciones realizadas.

En la fig. 46 observamos que la aleación BM25 es mayor a el resto de las muestras, siendo los tres superiores en dureza a la matriz pura de Aluminio.

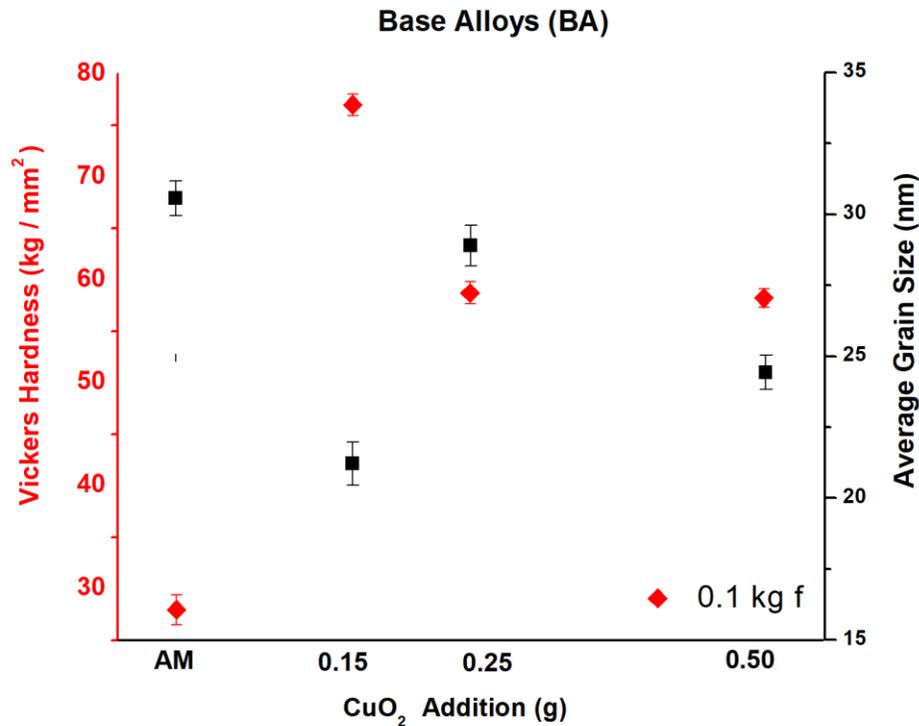


Figura 46. Fluctuación de dureza en correlación con el tamaño de grano.

Cuando las partículas de refuerzo se añaden a la matriz fundida, flotan sobre la superficie de la masa fundida. Generalmente, la agitación, mezcla dichas partículas en la masa fundida, pero cuando se detiene la agitación, las partículas tienden a volver a la superficie, el material refuerzo devuelve su propiedad inherente de dureza a la matriz blanda. El Modelo de Bouvard muestra que pequeñas cantidades de partículas finas de refuerzo cubren la superficie de polvos metálicos gruesos [69]. Esto puede ser la razón del incremento en la dureza de la muestra; Así como también a los efectos combinados de la distribución de las partículas de óxidos que actúan como obstáculos en el movimiento de las dislocaciones, los defectos, el contenido de porosidad y la microestructura que pueden aumentar o retardar la nucleación, además que, la dureza presentada por la deformación localizada de los materiales, lo que puede no tener en cuenta la presencia de porosidad en los materiales [69-70]. Por lo tanto, se le atribuye un tamaño de grano reducido, como se observa en la gráfica.

En las muestras BM25 y BM50 la dureza disminuye, esto se atribuye a la dispersión de partículas creando una solución sólida con estructura granular uniforme y tamaño promedio de grano por encima de BM15, así como aumentando la deformación plástica.

3.2.2.2 Fluctuación de HV en recocidos.

Se realizó el recocido a cuatro diferentes temperaturas por 12 h, en la figura 47 se puede observar que a mayor temperatura mayor es la deformación plástica para todas las aleaciones, alcanzado un estado de equilibrio a partir de los 500°C.

Las muestras AA 0.15 y AA 0.25 obtienen su dureza máxima en los 300°C por encima de la dureza inicial de la AM, al contrario de la muestra AA 0.50 donde la disminución de dureza es evidente a partir de esta temperatura.

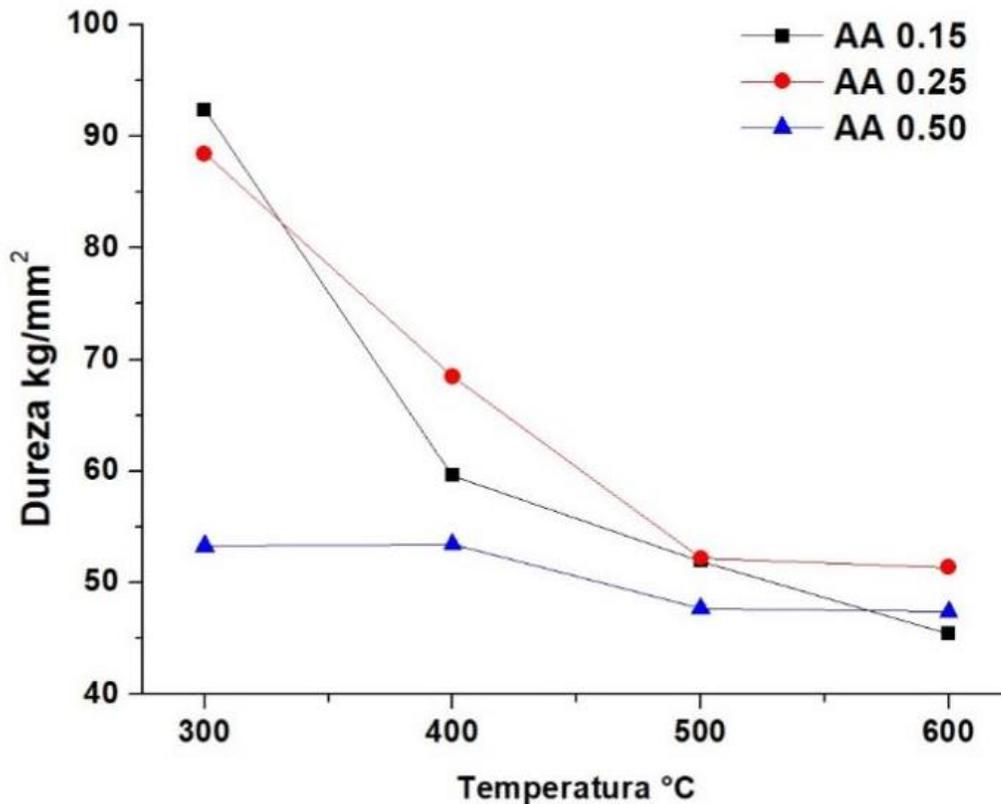


Figura 47. Compendio de dureza de los recocidos.

3.2.2.3 Fluctuación de HV de muestras con recocido en atmosfera de Argón.

Para el recocido en atmósfera de argón se fabricó y diseño un prisma rectangular de lámina de acero, la cual se adaptó al horno donde el Argón estuvo en recirculación durante las 12 h del recocido a 600°C.

En la figura 48 observamos la fluctuación de dureza de las BA sometidas a recocido con distinta atmósfera a una temperatura de 600°C. Las aleaciones recocidas mantienen el mismo comportamiento a las muestras recocidas en atmósfera de argón, pero su dureza es menor, esto se atribuye a la cantidad de óxidos intermetálicos generados durante el tratamiento térmico.

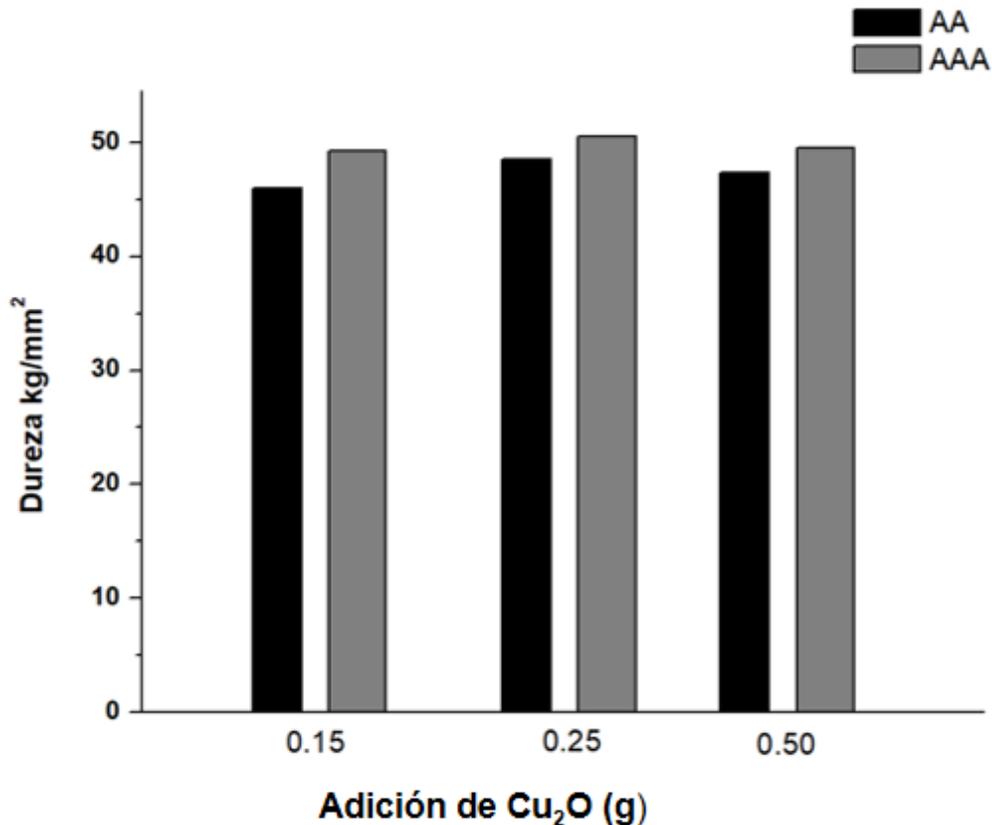


Figura 48. Variación de dureza de muestras recocidas en distinta atmosfera.

3.2.2.4 Fluctuación de HV de muestras con temple y revenido.

Las muestras BA se templaron en Salmuera (-13°C) y Aceite IBERTEM MS 50 de media velocidad de enfriamiento y se realizaron las pruebas de dureza. Posteriormente se les realizó un revenido a 260°C durante 1 h y nuevamente se tomaron las medidas de dureza Vickers; los resultados se muestran en la figura 49 donde es claro que tanto el temple y revenido con salmuera aumentan la dureza en comparación del uso del aceite.

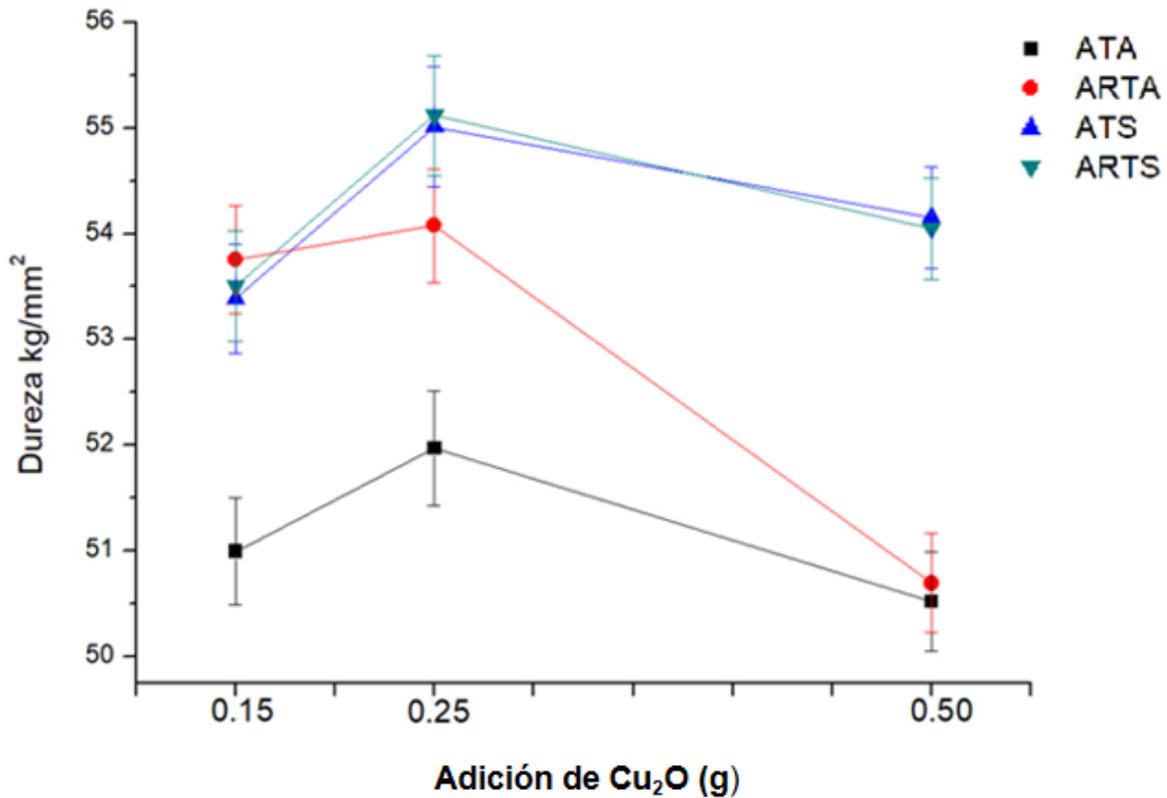


Figura 49. Fluctuación de dureza de temples y revenidos.

La figura 50 muestra la fluctuación de microdureza Vickers para cada uno de los tratamientos térmicos que se realizaron; Los tres compositos mantienen el mismo comportamiento, los revenidos mejoraron los efectos del temple en los tres compositos, siendo mejor la salmuera para este proceso.

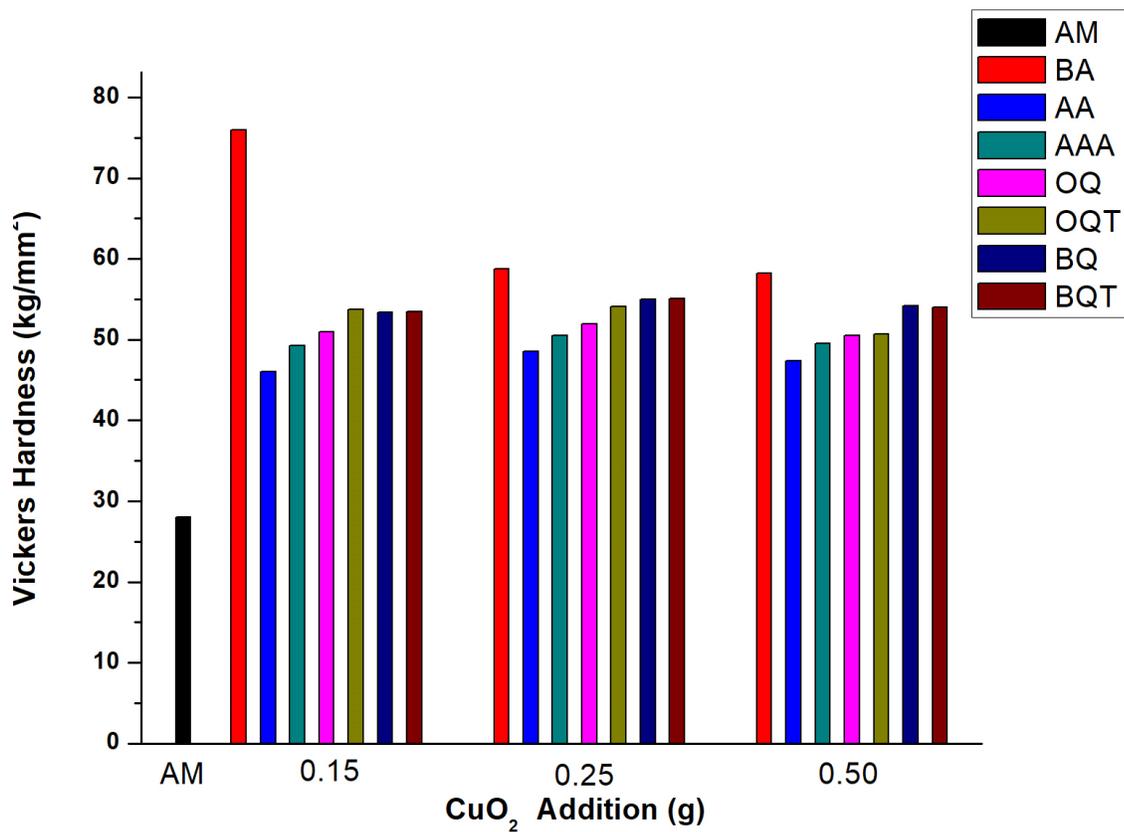


Figura 50. Fluctuación de dureza en los distintos tratamientos térmicos.

3.2.3 Caracterización Eléctrica

Es bien sabido que la resistencia eléctrica de un material es proporcional a la resistividad eléctrica y es inversamente proporcional a la conductividad eléctrica [71]. En el gráfico de la Figura 51 se puede observar una línea horizontal que denota el valor de la conductividad eléctrica del aluminio, este resultó 3.5 S/m a 20°C, tomando este valor como referencia, se puede observar que la adición de dióxido de cobre en combinación con los diferentes tratamientos térmicos tiende a aumentar la conductividad eléctrica.

Sabemos que, los óxidos de cobre se incluyen en la familia de los superconductores [72] [73] y se denominan superconductores de alta temperatura ya que exhiben superconductividad a aproximadamente 195°C.

Para las muestras de OQ con 0.15 g de CuO_2 se observa que mantiene la conductividad eléctrica cerca del valor del aluminio sin alear. La disminución de la conductividad eléctrica para el resto de las muestras con esta adición se ha atribuido como resultado del aumento gradual en el número y tamaño de las partículas de CuO_2 , lo que conduce a una disminución en la conductividad del material compuesto debido a la dispersión de electrones; Este efecto se ha correlacionado con impurezas en la matriz de aluminio [72-74].

Para las muestras con la adición de 0.25 y 0.50 se observa que en las muestras AA, AAA y OQT la conductividad aumenta, esto se atribuye al bajo índice de precipitados en la superficie lo que produce un efecto parcialmente libre en la matriz [72], por consecuencia este fenómeno genera un incremento en los valores de conductividad eléctrica.

Por otro lado, la correlación no lineal de la conductividad eléctrica con la dureza quizás sea resultado de las diferencias en respuesta de la dureza con los tratamientos térmicos, la cual se ha visto afectada vía generación de precipitados de cobre y aluminio de diferente tamaño y de forma aleatoria. dispersos, creados durante las diferentes etapas de envejecimiento [72,75-77].

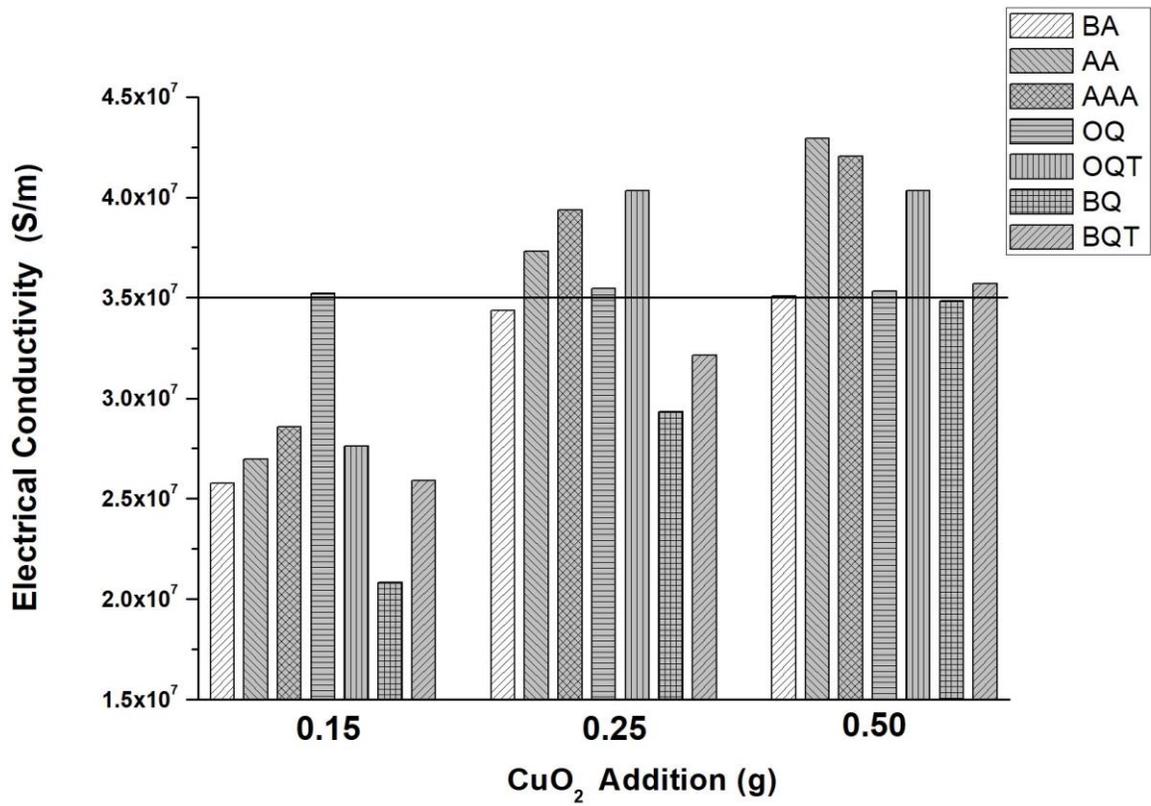


Figura 51. Gráfico de la variación de la conductividad eléctrica para muestras con diferentes tratamientos térmicos y diferentes adiciones de CuO₂.

3.3 MATERIAL COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE ALUMINIO REFORZADO CON PARTÍCULAS DE Ni80Cr20

El proceso de creación de los composites consistió en adicionar 60, 30 y 20 g de refuerzo (43C-NS) a la matriz de aluminio (30 g) mediante el proceso de fundición por agitación. El proceso de agitación se llevó a cabo a una velocidad constante de 450 rpm y un incremento de temperatura de 750 °C a 1020°C. Posterior a esto se realizó el prensado en caliente (7.6 Mpa). Para obtener la muestra final se cortaron los crisoles que anteriormente se diseñaron desechables, el corte de las piezas se realizó a chorro de agua. Posterior a esto todas las muestras se llevaron a pulido a espejo para pruebas mecánicas y microestructurales.

Se realizó un sinterizado a 950°C por 1 h, los recocidos se llevaron a cabo a temperaturas de 300 °C y 500 °C por 3 y 5 h. Se aplicó un temple a una temperatura de 500 °C por 1 h en salmuera, la cual alcanzó una temperatura de -15 °C. Todas las muestras se clasificaron de acuerdo con la siguiente tabla, con la terminación de la distinta adición.

Tabla 12. Nomenclatura de muestras realizadas.

Código	Descripción	
M	Muestra base	Con adición de 60, 30, 20 g
MR3	Muestra recocida a 300 °C	
MR5	Muestra recocida a 500 °C	
MR3T	Muestra recocida a 300°C, templada en salmuera	
MR5T	Muestra recocida a 300°C, templada en salmuera	

3.3.1 Caracterización microestructural

Se realizó el estudio de la muestra M60 en la figura 50. observamos aglomerados o fases anidadas no uniformes. Lo que genera la existencia de una o dos capas formadas en la superficie. En análisis EDS mostrado en la tabla 13. indica que la zona 1 marcada en la figura 52, contienen los tres elementos esperados más oxígeno. En la zona 2 y 3 se observa el níquel que se encuentra en mayor proporción.

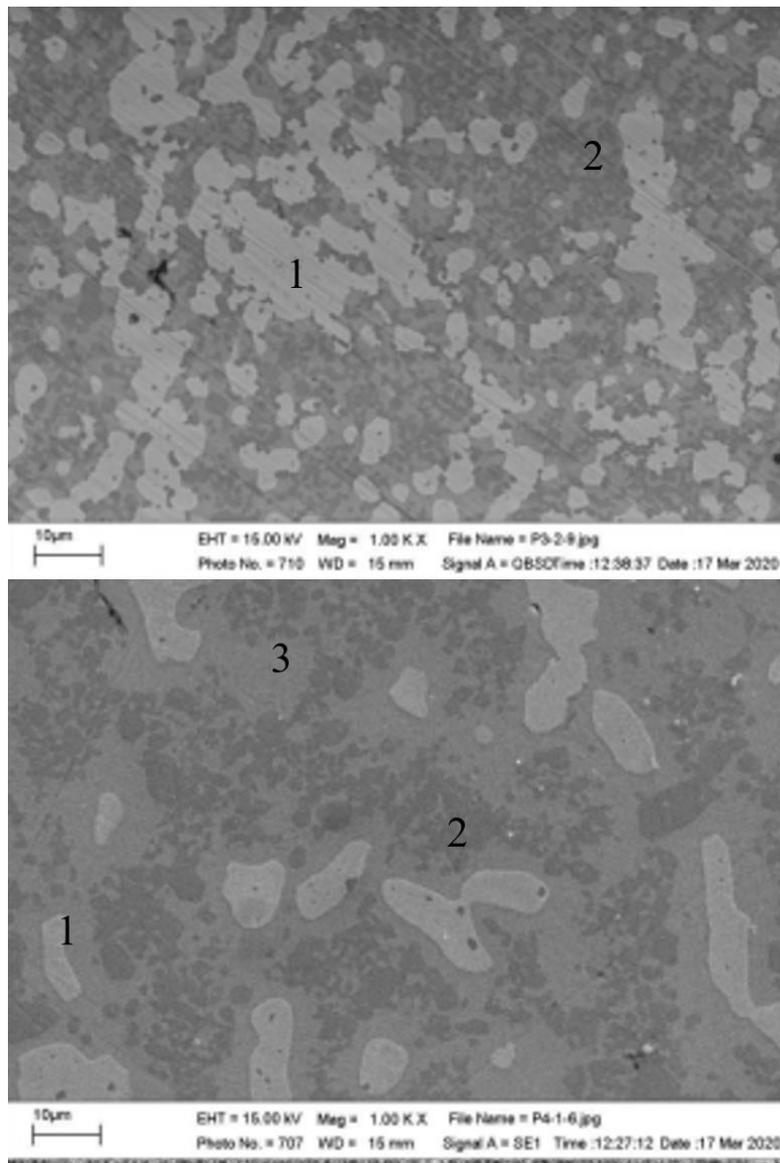


Figura 52. Micrografía de la muestra M60

Tabla 13. EDS muestra M60

ZONA	Al	O	Cr	Ni
1	41.59	48.25	3.68	6.48
2	9.28		7.95	82.77
3	14.89		6.35	78.75

3.3.1.1 X-ray diffraction (XRD)

El análisis de los patrones de difracción de rayos X, detecto las siguientes las fases de óxidos: Al_2O_3 , Al_2NiO_4 , Cr_2O_3 y NiO (fig 53). También se encontró en cantidades muy pequeñas el Cr_2NiO_4 , lo que se atribuye a que el proceso de preparación de la muestra posibilita la creación de nuevos óxidos.

Entry	Formula sum	Name	Quant.(%)
96-120-0006	Al ₂ O ₃	Aluminium oxide - β -theta	62.3
96-900-6020	Al ₂ Ni O ₄		16.8
96-901-4068	Cr ₂ O ₃	Eskolaite	14.0
96-101-0382	Ni O	Nickel oxide	6.8

Entry	Formula sum	Name	Quant.(%)
96-120-0006	Al ₂ O ₃	Aluminium oxide - β -theta	60.4
96-101-1068	Cr ₂ O ₃	Chromium oxide Eskolaite	11.1
96-101-0382	Ni O	Nickel oxide	10.3
96-101-1031	Cr ₂ Ni O ₄	Nickel dichromium oxide Nichromite	9.7
96-900-6015	Al ₂ Ni O ₄		8.4

Entry	Formula sum	Name	Quant.(%)
96-120-0006	Al ₂ O ₃	Aluminium oxide - β -theta	48.2
96-901-5443	Cr ₂ O ₃	Eskolaite	23.2
96-101-0094	Ni O	Nickel oxide	19.5
96-900-5956	Al ₂ Ni O ₄		9.1

Figura 53. Fases de las muestras M60, M30, M20.

Se determino el tamaño de las partículas obtenidas a partir del espectro de difracción de rayos X midiendo el porcentaje promedio del ancho a mitad de altura (FWHM) de los picos característicos, para cada una de los compositos; el tamaño promedio de cristal de la muestra M60 es de 25.91 nm, para la muestra M30 17.22 nm y para M20 7.56 nm.

3.3.2 Propiedades Mecánicas

Se obtuvieron tres compositos como se observa en la siguiente figura.



Figura 54. Muestras M60, M30, M20.

Todas las muestras se seccionaron de la siguiente manera (fig.55), obteniendo cuatro piezas principales para su estudio, es decir un total de 12 muestras.

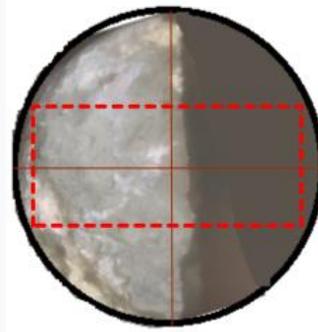


Figura 55. Corte de piezas principales de las muestras M60, M30, M20.

El análisis de dureza se realizó en las zonas observadas en la figura 56 b) de las piezas obtenidas, con el fin de cubrir la mayor parte posible de las muestras y asegurar la homogeneidad de esta.

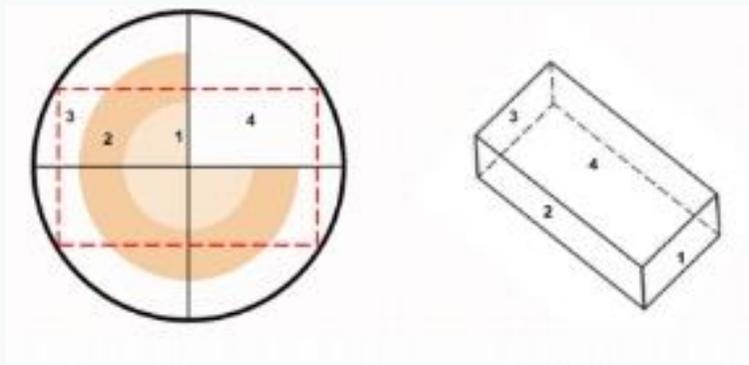


Figura 56. a) Corte de muestras b) zonas de medición

3.3.2.1 Dureza Vickers inicial de compositos

Para asignar un valor promedio de dureza (HV) a cada una de las caras de los compositos se realizó el análisis de cada cara de las cuatro piezas obtenidas. En la figura 57, podemos observar el comportamiento de la dureza de cada cara correspondiente a las piezas de la muestra M60. Podemos observar que el comportamiento es similar en cada cara mostrando mayor dureza para todos en la cara 3, es decir, en la parte más lejana al centro, este comportamiento se atribuye a que los polvos finos tienden a subir a la superficie [69], la disminución en la dureza de la cara uno, aparentemente se debe al vórtice generado por la agitación y el tiempo de movimiento hacia el método de prensado.

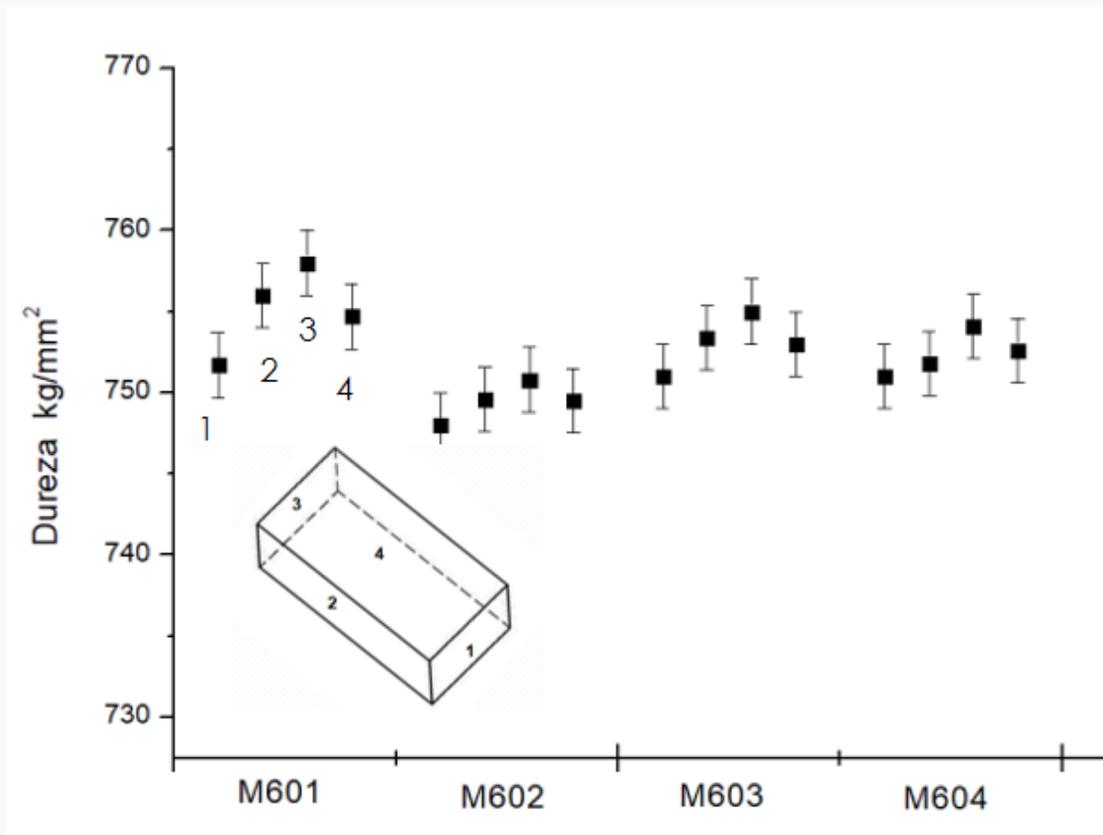


Figura 57. a) Fluctuación de dureza por caras de la muestra M60. b) Distancia al centro de medición.

Lo descrito anteriormente fue realizado de la misma manera para los tres compositos, obteniendo los resultados finales del promedio de dureza como observamos en la figura

58. Siendo el compuesto M60 el que muestra 154 ± 1 puntos de HV por encima de la muestra M20 y $107 \pm .05$ sobre la muestra M30.

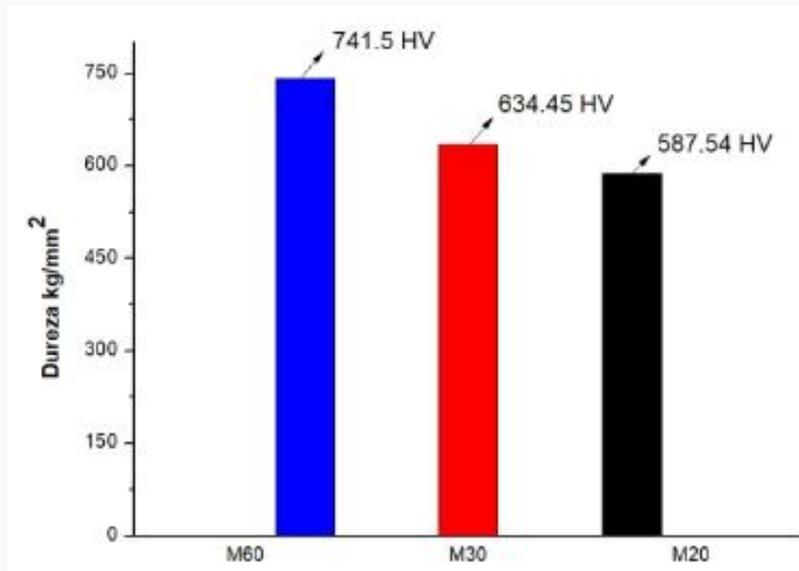


Figura 58. Promedio de dureza de las muestras M60, M30 y M20

3.3.2.2 Fluctuación de Dureza Vickers después de tratamientos térmicos

Aplicados los tratamientos térmicos a 300°C y 500°C por 3 h, se observa en la figura 59, un aumento de dureza para las seis muestras, este comportamiento se atribuye a la alta densidad de las partículas que flotan en la masa fundida, lo que conduce a una distribución uniforme y fuerte unión interfacial entre la matriz y las partículas, evitando que ocurra el aumento en la deformación plástica.

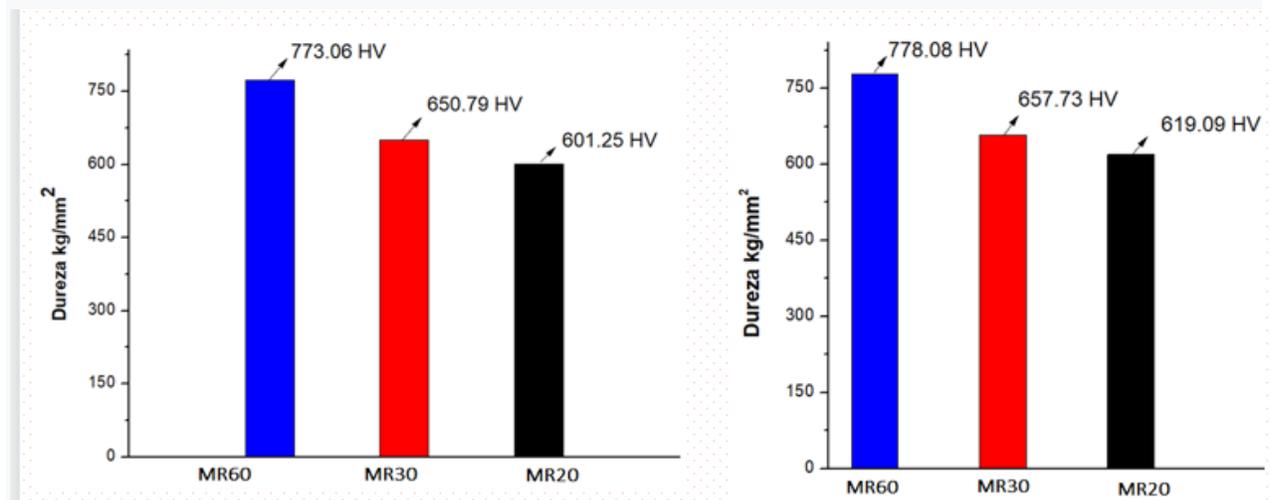


Figura 59. Promedio de dureza de las muestras M60, M30 y M20 expuestas a recocido a 300°C b) Expuestas a 500 °C

3.3.2.3 Fluctuación de dureza después de Temple en salmuera

Aplicado el temple a una temperatura de aproximadamente -15°C el aumento en la dureza es visible y significativo. Con ayuda de la figura 60, podemos ver el incremento que puede ir desde los ± 7 puntos de microdureza vickers hasta los ± 110 en los diferentes compositos.

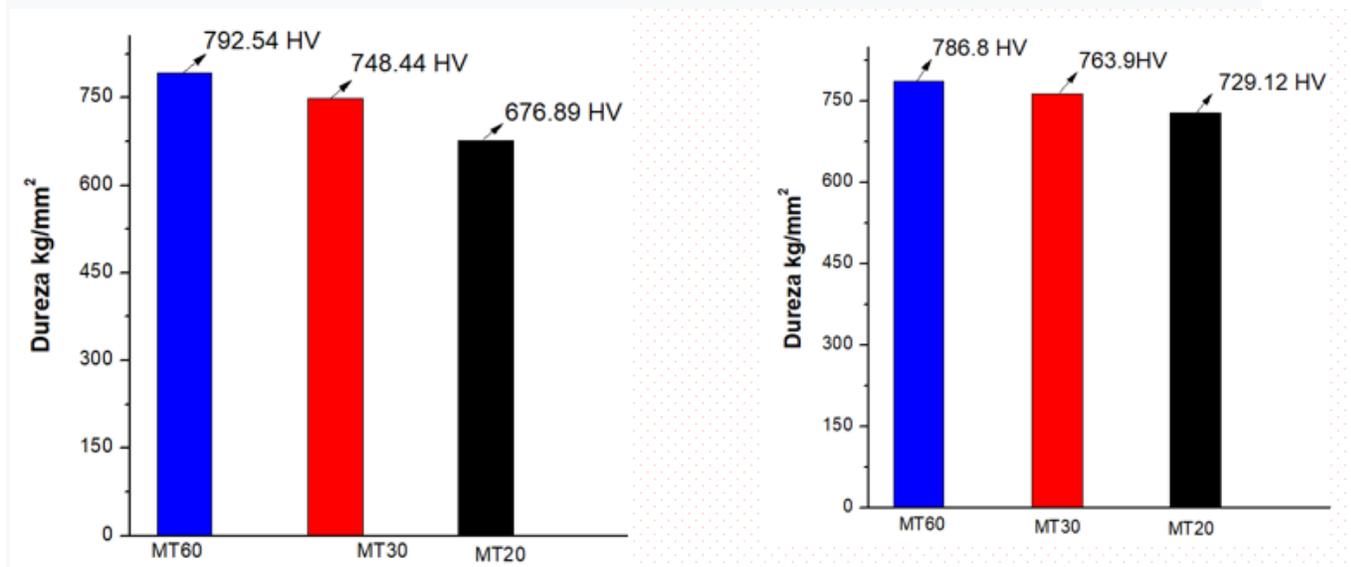


Figura 60. Promedio de dureza de las muestras M60, M30 y M20 expuestas a recocido a 300°C y templadas en salmuera b) Expuestas a 500 °C y templadas en salmuera.

3.3.2.4 Fluctuación de dureza de todos los compositos

En la figura 61 podemos observar el comportamiento de cada uno de los compositos donde la tendencia es similar. Reforzar la matriz de aluminio con distintas cantidades de Ni80Cr20 en combinación con los diferentes tratamientos dio como resultado obtener una mejora significativa por arriba de la dureza promedio de los elementos puros.

Las durezas máximas mostradas en esta figura corresponden a la muestra M60, templado en salmuera, pero son estas mismas muestras templadas las que presentan un cambio visible a menor adición.

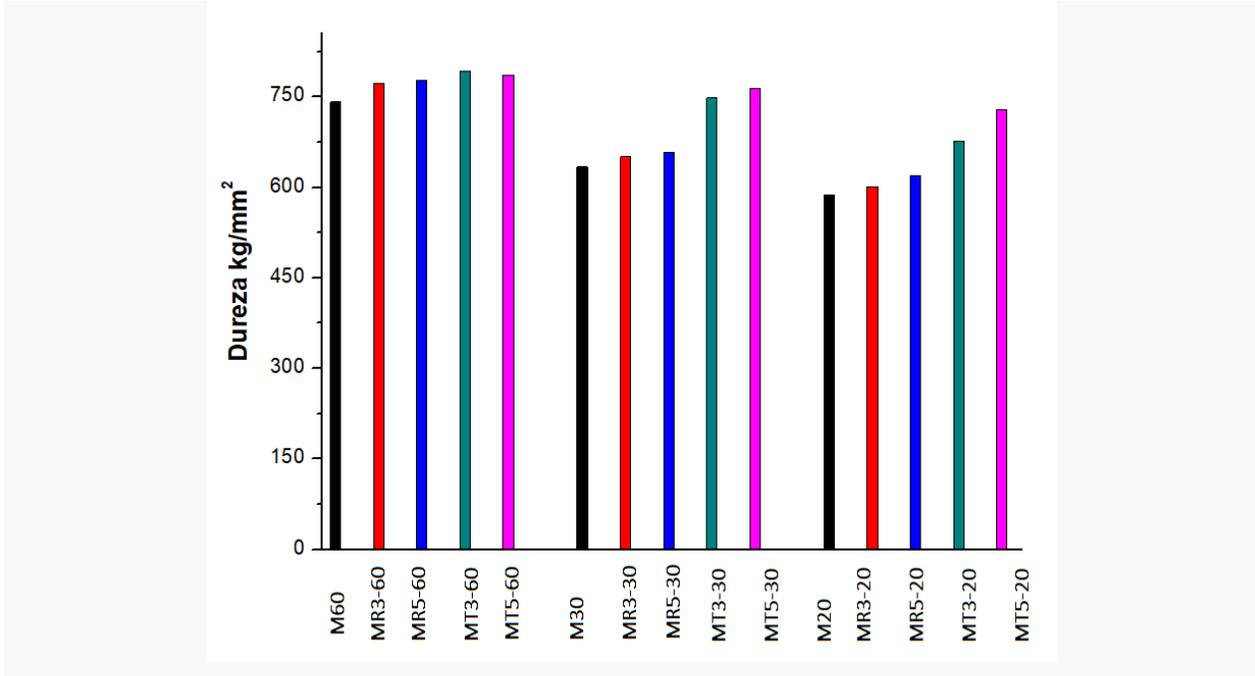


Figura 61. Fluctuación de dureza en los distintos tratamientos térmicos.

3.3.3 Caracterización Eléctrica

Ni80Cr20 es conocida por su alta resistividad eléctrica. Esto significa que ofrece una resistencia significativa al flujo de corriente eléctrica a través de él. Su alta resistividad la hace útil para aplicaciones de calentamiento eléctrico [78].

Su resistividad controlada y su capacidad para mantener sus propiedades eléctricas a altas temperaturas lo hacen valioso en aplicaciones específicas, la caracterización eléctrica del Ni80Cr20 se centra en su resistividad, su capacidad para mantener sus propiedades a altas temperaturas y su capacidad para resistir la oxidación. Estas propiedades hacen que esta aleación sea valiosa en una variedad de aplicaciones eléctricas y de calefacción [79].

Su resistividad eléctrica varía ligeramente dependiendo de la forma específica y el tratamiento térmico de la aleación, pero por lo general se encuentra en el rango de aproximadamente 1.10 a 1.12 microohmios por centímetro ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$) a temperatura ambiente (20°C). Esta resistividad relativamente alta es una de las características clave y es lo que lo hace adecuado para aplicaciones de calentamiento eléctrico [78-80].

Para los compositos realizados se logró disminuir ligeramente sobre este valor promedio la resistividad eléctrica de las tres muestras iniciales y de las mismas recocidas a 300°C , siendo solamente las muestras recocidas a 500°C las que aumentaron la resistividad eléctrica con una tendencia similar y promedio de $1.84 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ como se observa en la figura 62.

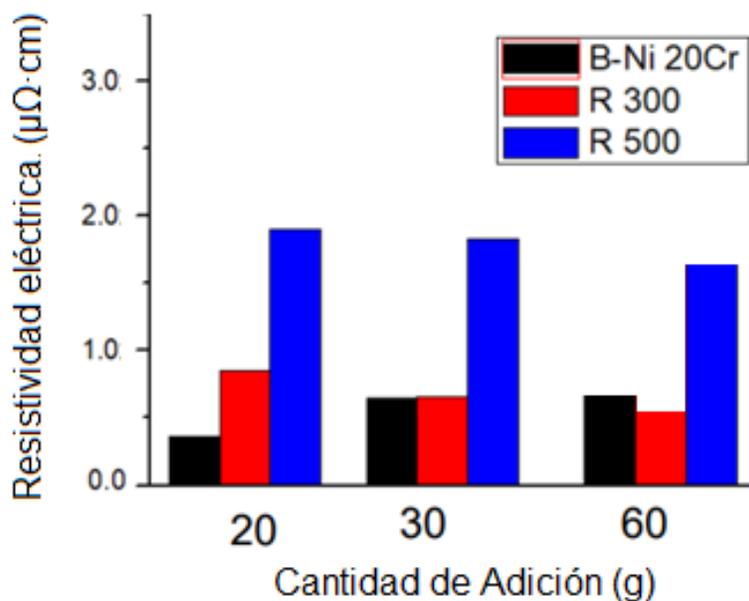


Figura 62. Resistividad eléctrica.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- El método de fundición por agitación es fundamental para el desarrollo de mejoras en las propiedades mecánicas y eléctricas.
- La sencilla y económica fabricación de un material compuesto es atractiva desde el punto de vista de acoplar las propiedades eléctricas y mecánicas, en una posible aplicación industrial.
- Se demostró que el comportamiento de la dureza puede ser controlado variando la cantidad de porcentaje de adición del refuerzo.
- Las partículas como refuerzos mejoran la superficie morfológica y reducen el tamaño de grano.
- El recocido en atmosfera de Argón disminuye las cantidades de óxidos metálicos formados manteniendo una dureza mayor al recocido.
- Los revenidos mejoraron los efectos del temple en todas las aleaciones, siendo mejor la salmuera para este proceso.
- La adición de partículas de óxidos combinado con el envejecimiento térmico existe un aumento de conductividad eléctrica.
- A pesar de no contar con un ambiente controlado en humedad y temperatura; se logró la obtención de excelentes propiedades eléctricas con las muestras realizadas, así mismo se apreció claramente como influye el tamaño de grano en estas propiedades. De esta forma fue posible cumplir con los objetivos planteados al inicio del proyecto. Sin embargo, cabe aclarar que en el caso de la muestra M60, los resultados fueron adversos, recomendándose realizarlas nuevamente para descartar un error en el proceso de deposición o tratamiento térmico y confirmar su comportamiento.
- Por último, se sugiere continuar en el estudio de la optimización de sus propiedades y parámetros de fabricación de los AMMCs, con la finalidad de obtener un material que manifieste mayor agudeza en sus propiedades eléctricas; con ello consagraría al material en aplicaciones automotrices y electrónicas.

REFERENCIAS

- [1] Kumar, Naveen; G., Irfan (2020). *A review on tribological behaviour and mechanical properties of Al/ZrO₂ metal matrix nano composites. Materials Today: Proceedings, (), S2214785320361101–. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.240*
- [2] Lai, J., Zhang, Z., & Chen, X. G. (2013). Precipitation strengthening of Al–B₄C metal matrix composites alloyed with Sc and Zr. *Journal of Alloys and Compounds*, 552, 227–235.
- [3] Zhang, Q., Ma, X., & Wu, G. (2013). Interfacial microstructure of SiCp/Al composite produced by the pressureless infiltration technique. *Journal of the Ceramic Institute*, 39, 4893–4897.
- [4] Li, G., Zhao, Y., Wang, H., Chen, G., Dai, Q., & Cheng, X. (2009). Fabrication and properties of in situ (Al₃Zr+Al₂O₃) p/A356 composites cast by permanent mould and squeeze casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 471, 530–535.
- [5] Ansary Yar, A., Montazerian, M., Abdizadeh, H., & Baharvandi, H. R. (2009). Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy matrix composite reinforced with nanoparticle MgO. *Journal of Alloys and Compounds*, 484, 400–404.
- [6] Wang, H., Jiang, Q., Wang, Y., Ma, B., & Zhao, F. (2004). Fabrication of TiB₂ particulate-reinforced magnesium matrix composites by powder metallurgy. *Materials Letters*, 58(20), 3509–3513.
- [7] Qu, H., Zhu, S., & Li, Q. (2012). Influence of sintering temperature and holding time on the densification, phase transformation, microstructure, and properties of hot-pressing WC-40 vol.% Al₂O₃ composites. *Journal of Ceramic Institute*, 38, 1371–1380.

- [8] Mavhungu, S. T., Akinlabi, E. T., Onitiri, M. A., & Varachia, F. M. (2017). Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends. *Procedia Manufacturing*, 7, 178-182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.045>
- [9] Miravete, A., Larrodé, E., Castejón, L., Clemente, R., Jiménez, M. A., Lizaranzu, M., ... Peralta, J. L. (2007). *MATERIALES COMPUESTOS TOMO I*. Madrid, España: Reverté, S.A., 195-243.
- [10] Gibson, R. F. (1994). *Principles of Composite Material Mechanical*. New York: McGraw-Hill Inc.
- [11] Campbell, F. C. (2010). *Introduction to Composite Materials*. En *Structural Composite Materials* (pp. 1-10). Ohio: ASM International.
- [12] Reddy Nagavally, R. (2017). *Composite Materials- History, Types, Fabrication*. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5(9), 82-87.
- [13] Folch, D. (2003). *Genghis Khan: Como se hizo su imperio*. *National Geographic*, January(1), 100-110.
- [14] Alonso Rubio, M. V. (2002). *Formulación y curado de resinas fenol-formaldehído tipo resol con sustitución parcial del fenol por lignosulfonatos modificados (Proyecto doctoral)*. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, Madrid, España.
- [15] Miravete, A. (1995). *Los nuevos materiales en la construcción (2da ed.)*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- [16] Lobo, A. (2020, 5 de abril). *History on the invention of composites and how it helped the British to win WW-2* [En línea]. Disponible en: <https://medium.com/@ashleylobo98/a-history-on-the-invention-of-composites-and-how-it-helped-the-british-to-win-ww-2-e04dea6d3d51> [Acceso el 18 de mayo de 2022].

[17] Foltz, T. (2020, 24 de junio). Boron fiber: The original high-performance fiber. History and future developments for high-performance boron fiber [En línea]. Disponible en: <https://www.compositesworld.com/articles/boron-fiber-the-original-high-performance-fiber> [Acceso el 19 de mayo de 2022].

[18] Ngo, T. (2020). Introduction to Composite Materials. En Composite and Nanocomposite Materials- From Knowledge to Industrial Applications (pp. 1-27). doi: 10.5772/intechopen.91285

[19] ASM Handbook, Composite, Vol. 21. (2001).

[20] The Metals Handbook Desk Edition. (1998).

[21] Handbook of Materials Selection. (2002).

[22] Avinash, K., & Satyajeet, S. (2011). Wear Property of Metal Matrix Composite. Bachelor of Technology in Metallurgical & Materials Engineering project. National Institute of Technology, Rourkela.

[23] de Souza, M. C., Moroz, I., Cesarino, I., Leão, A. L., Jawaid, M., & Dias, O. A. T. (2022). A Review of Natural Fibers Reinforced Composites for Railroad Applications. Applied Science and Engineering Progress, 15(2), 5800-5800.

[24] Callister, W. D., Jr. (2008). Materials Science and Engineering. John Wiley & Sons, pp. 400-736

[25] Rogelio, D. L. (2016). Síntesis de un nanocompósito Al7075-grafito mediante aleado mecánico y extrusión en caliente (Proyecto doctoral). Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua, Chihuahua, México.

[26] Chawla, K. (2012). Interfaces in metal matrix composites. *Composite Interfaces*, 4, 287-298. doi: 10.1163/156855497X00046.

[27] Moral Baladín, A. B. (2016). Mejora de la interfaz de materiales compuestos Cu-C, para la evacuación térmica por medio de elementos carburígenos (Proyecto de tesis). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, España.

[28] Dueñas Castillo, et al. (2001). Estudio de la Mojabilidad en Materiales Compuestos de Matriz Metálica. *Memorias Jornadas de Investigación 1999-2000*, Tomo 2, UPB, Medellín.

[29] Beffort, O. (s.f.). Metal matrix composites: from space to earth. Recuperado de <http://www.empa.ch/abt126> [Acceso el 23 de mayo de 2022].

[30] Rakesh, P., & Davim, J. P. (2022). Joining of metal matrix composites. En *Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series, Joining Processes for Dissimilar and Advanced Materials* (pp. 445-461). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-323-85399-6.00002-3.

[31] Fernández, M. P., Martínez, V., Valencia, M., & Cruz, J. (2006). Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica en el sector eléctrico y electrónico. *DYNA*, 73(149), 131-140.

Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000200011&lng=en&tlng=es.

[32] Bharat, N., & Bose, P. S. C. (2022). A Study on Machining Behaviour of Metal Matrix Composite: A Review. En K. Govindan, H. Kumar y S. Yadav (Eds.), *Advances in Mechanical and Materials Technology (Lecture Notes in Mechanical Engineering)*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2794-1_33

[33] Singh, H., Brar, G. S., Kumar, H., & Aggarwal, V. (2021). A review on metal matrix composite for automobile applications. *Materials Today: Proceedings*, 10.1016/j.matpr.2020.11.670.

[34] Pandiyarajan, R., Maran, P., Marimuthu, S., & Arumugam, K. (2019). Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welded AA6061-ZrO₂-C hybrid MMCs. *Materials Today: Proceedings*, 10.1016/j.matpr.2019.06.760.

[35] Ramnath, B. V., Elanchezhian, C., Annamalai, R. M., Aravind, S., Atreya, T. S. A., Vignesh, V., & Subramanian, C. (2014). Aluminium metal matrix composites - a review. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 38, 55-60.

[36] Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7th ed.). John Wiley & Sons Inc.

[37] Arunachalam, R., Ramanathan, M., & Krishnan, P. (2019). A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges, and research opportunities. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 213-245. 10.1016/j.jmapro.2019.04.017.

[38] Fan, D. W., Kim, H. S., & De Cooman, B. C. (2009). A Review of the Physical Metallurgy related to the Hot Press Forming of Advanced High Strength Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 80(3), 10.2374/sri08sp131.

[39] European Commission. (2004). *Second Position Paper on Particulate Matter*. CAFE Working Group on Particulate Matter.

[40] Leparoux, M., Kollo, L., Kwon, H., Kallip, K., Babu, N. K., AlOgab, K., & Talari, M. K. (2018). *Solid State Processing of Aluminum Matrix Composites Reinforced with*

Nanoparticulate Materials. *Advanced Engineering Materials*, 20(11), 1800401.
doi:10.1002/adem.201800401

[41] Solache-Carranco, H., Pena-Sierra, R., & Juarez Diaz, G. (2007). Study of the Crystallization Process of Cu₂O Samples from Polycrystalline Copper Plates. In 2007 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE 2007) (pp. 337). Mexico City, Mexico. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4345036&isnumber=434497>
1

[42] Landolt-Bornstein-Group III Condensed Matter, Non-Tetrahedrally Bonded Elements and Binary Compounds I, Volume III/17E-17F-41C, Cuprous Oxide (Cu₂O) crystal structure, lattice parameters (Published by Springer-Verlag, Jun 2006).

[43] Kazi, I. H., Wild, P. M., Moore, T. N., & Sayer, M. (2006). Characterization of sputtered nichrome (Ni–Cr 80/20 wt.%) films for strain gauge applications. *Thin Solid Films*, 515(4), 2602–2606. doi: 10.1016/j.tsf.2005.10.077

[44] Ayala Aquice, D. A. (sin fecha). *Curso Biología General y Aplicada*. Facultad de Ciencias de la Salud - Universidad Nacional del Altiplano - UNAP – Puno.

[45] Hren, J. (2013). *Introduction to Analytical Electron Microscopy*. Springer Science & Business Media. (Originalmente publicado por Plenum Press en 1979).

[46] Otten, M. (1996). *Transmission Electron Microscopes in Materials Research*. Philips Electronics, Eindhoven.

[47] Goldstein, J., et al. (2017). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis: A Text for Biologists*. 4th Edition. Springer.

[48] Garratt-Reed, A. J., & Bell, D. C. (2003). Energy-Dispersive X-Ray Analysis in the Electron Microscope. BIOS Scientific Publishers, Ltd., Oxford, U.K.

[49] Callister, W. D., Jr. (2007). Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverté.

[50] Avenr, S. H. (1985). Introducción a la metalurgia física. Segunda edición. Editorial Mc Graw-Hill.

[51] Lasheras Y Esteban, J. M. (1978). Tecnología del acero. Tercera edición. Editorial Cedel.

[52] Askeland, R. D. (2001). Ciencia e ingeniería de los materiales. Cuarta edición. Editorial Thomson.

[53] Reed-Hill, R. E. (1998). Principios de metalurgia física. Segunda edición. Editorial C.E.C.S.A.

[54] Department of defense handbook. (2002). Composites materials handbook. Vol 4. Metal matrix composites.

[55] Da Costa, C. E., Velasco López, F., & Torralba Castelló, J. M. (2000). Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones.

[56] Manual de Operaciones Matsuzawa Seiki.

[57] Miyake, K., Matsuura, T., & Varma, C. M. (1989). Relation between resistivity and effective mass in heavy-fermion and A15 compounds. Solid State Communications, 71(12), 1149-1153. doi:10.1016/0038-1098(89)90729-1

[58] Callister, W. (2003). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Reverté.

[59] Murray, J., Peruzzi, A., & Abriata, J. P. (1992). J. Phase Equilibria, 9, 153-90. (Referencia original: vol. 13, pp. 277-91).

[60] Fink, W. L., & Willey, L. A. (1939). Met. Technol., 1, 69-80.

[61] Murray, J., Peruzzi, A., & Abriata, J. P. (1992). J. Phase Equilibria, 13, 277-91.

[62] Karthikeyan, G., & Jinu, G. R. (2017). Tensile Behavior and Fractography Analysis LM6 / ZrO₂ Composites. Materiali in Tehnologije / Materials and Technology, 51(3), 549-553.

[63] Andrade, C. (2009). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y su durabilidad. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

[64] Chen, G., Sun, G., & Zhu, Z. (1998). On the Chemical Reactions to Process Particle Reinforced Al-Cu Alloy Matrix Composites

[65] Hashimoto, S. and Yamaguchi, A. (1998) Fabrication and Properties of Novel Composites in the System Al-Zr-C. Journal of Materials Science, 33, 4835-4842. <https://doi.org/10.1023/A:1004482314339>

[66] Zhang, W.Y., Du, Y.H., Zhang, P. and Wang, Y.J. (2019) Air-Isolated Stir Casting of Homogeneous Al-SiC Composite with No Air Entrapment and Al₄C₃. Journal of Materials Processing Technology, 271, 226-236. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.001>

[67] Ru, J., He H., Jiang, Y., Zhou, R. and Hua Y. (2019) Wettability and Interaction Mechanism for Ni-Modified ZTA Particles Reinforced Iron Matrix Composites. Journal of Alloys and Compounds, 786, 321-329. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.34>

[68] Rong, X., Zhao, D., He, C., Shi, C., Liu, E. and Zhao, N. (2020) Revealing the Strengthening and Toughening Mechanisms of Al-CuO Composite Fabricated via In-Situ Solid-State Reaction. *Acta Materialia*, 204, Article ID: 116524. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.116524>

[69] Bouvard, D. (2000) Densification Behavior of Mixtures of Hard and Soft Powders under Pressure. *Powder Technology*, 111, 231-239. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00293-4](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00293-4)

[70] Pereyra-Hernández, J., Ocampo, O., Falcon-Castrejon, R.A., Rosales-Cadena, I. and Ruiz-Ochoa, J.A. (2019) Synthesis and Characterization of Heat Treated Cu-Al Alloys for Energy Applications. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 7, 22-30. <https://doi.org/10.4236/msce.2019.711003>

[71] Chen, G., Sun, G. and Zhu, Z. (1998) On the Chemical Reactions to Process Particle Reinforced Al-Cu Alloy Matrix Composites. *Materials Science and Engineering: A*, 251, 226-231.

[72] The ASM International Committee (2001) *ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys*. The Materials Information Society, Materials Park, Ohio, 1-13.

[73] Salazar-Guapuriche, M.A., Zhao, Y.Y., Pitman, A. and Greene, A. (2006) Correlation of Strength with Hardness and Electrical Conductivity for Aluminium Alloy 7010. *Materials Science Forum*, 519-521, 853-858. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.853>

[74] Solache-Carranco, H., Juarez-Diaz, G., Esparza-Garcia, A., Briseno-Garcia, M., Galvan-Arellano, M., Martinez-Juarez, J., ... Pena-Sierra, R. (2007). Study of the Crystallization Process of Cu₂O Samples from Polycrystalline Copper Plates. 2007 4th

International Conference on Electrical and Electronics Engineering.
doi:10.1109/iceee.2007.4345036

[75] Koch, G.H. and Kolijn, D.T. (1979) The Heat Treatment of the Commercial Aluminum Alloy 7075. *Journal of Heat Treating*, 1, 3-14. <https://doi.org/10.1007/BF0283323>

[76] Orowan, E. (1948). *Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys, Session III Discussion*. Institute of Metals, London, England.

[77] Abbasi, M., Taheri, A. K., & Salehi, M. T. (2001). Growth Rate of Intermetallic Compounds in Al/Cu Bimetal Produced by Cold Roll Welding Process. *Journal of Alloys and Compounds*, 319, 233-241.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



Cuernavaca, Morelos, 02 de octubre de 2023.

DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

PRESENTE

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: **EFFECTO DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDOS METÁLICOS EN ALEACIONES DE ALUMINIO PRODUCIDAS POR INDUCCIÓN DE ALTA FRECUENCIA** (Síntesis y caracterización), que presenta la alumna **REYNA ANAHÍ FALCÓN CASTREJÓN**, para obtener el título del **DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

DRA. MARYNA VASILIVNA VLASOVA

DR. JORGE URUCHURTU CHAVARÍN

DRA. MAURA CASALES DÍAZ

DRA. ESTELA SARMIENTO BUSTOS

DRA. AMERICA MARIA RAMIREZ ARTEAGA

DR. ISAÍ ROSALES CADENA

Se adiciona efirma UAEM



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

MAURA CASALES DÍAZ | Fecha:2023-10-03 11:57:56 | Firmante

c+v6TLa6RcHITQ1dcx8JgAUcBCbbz2An5BHGwloKD2WPmHNahfMilsdct/+FQ2k1uGaunvfcAe4RgAUkW6FZcDcyptcZ8Bd9AFnibj8HrmyfEQZeeJhFjb+6scfjOVMQVBCNNncp3NLwZR4PWaMKBsTLRaMkyXHRQH+R2aUVNZIwayyJlp4+M8b11+xEZVUF0F9SZLi5cflR+DAvgr1c6TRRhQJBF1qhDnMTI6+ut/+AwHjpR0kDy4TBzPwC956FURu5CB0RfiYt26wegm1ZQxug7WY3v7lGcyyulNiR12/ceaYtgn2vAAweCoWYTP+1Mr6+Aqm3fc35F/V9F9tw==

JORGE URUCHURTU CHAVARIN | Fecha:2023-10-05 11:27:06 | Firmante

OJBKiaXa638J2rwY+flE44CXmPxoH6SjW5I5MBCINeNjhwTslvw9eb8D1Yg3VQZF/c0W5z4sfFwHDwccV+7JHf82yx7yhrHsuSVJjfXLXJQj53y6cXumil46SR1xCqJlIkho8vdLJuQuoa80qh3bnluWxexaGh/AfgcCg119mCvMG0LequurcL2GxiLrqmKv9qlqJJzb2Wkvd2JxITD1ERDEk9y2A0zyHdqjA8EjL2qvvgLORpwiGAJauG89HtsQjwkCFI/7VrM92vByrnex+vnnK6iaFE7R0/zlFFMo0ANKBIC68BpgRkgYfoU+L4fVviBWYTG3ADm1I5w==

ESTELA SARMIENTO BUSTOS | Fecha:2023-10-05 15:29:53 | Firmante

wb8Mvd9jvJOiyc2/fjW2nGmyRxoGa9U6/MF8zJTzIhYVvAGU9gtpKXFz610MI+3G0cTtYgprUw8nqQ0DFCDEOKWqPEDJgNgGx79YsbyGebcnfQifi1i8PRAMKt0tTuBhhJ7V7s9dXmaak5cUv686Fj7/q4Mm7cdlc7JUsGbGN91pf57Sv6/JM/y7kZvsyibHjh9fzoVv8qh3mJv09zYscbjg7RtjtlvrUtZAHh9x/zKH18cTewZyJ0iSadE5w/JgOo+vs5u0Vker3k/8Ois23sAkSKK0iy3d6zKOLWYpygBXg23jVbxmR3VWUxDBQ9iNNpWYXPs9V6N03KwKXew==

AMERICA MARIA RAMIREZ ARTEAGA | Fecha:2023-10-06 09:27:01 | Firmante

pl+seFNz1gtVfodeYg9UwSLS5qcRcBO2ky/Z2Cib+uGhE/b32qaw46k5wgQLsvjNKMmsuOqtilQSHKPxP01L6runFxZxcTwUzRdl0b6ieV6KBRyK8BY77EDbVz/LVtdHvjVo19exdY7nsbt0cFDwdGd3mOmE4ksxOtVl3ok9GB0xGuc5R7idXmi4bJtwK2xZdu2LZzvWYUZh6zBVZ7/cGDxkkl7VUuNsP/lyTLwkBvxhTfeP/854C0BKBpmozEU8h1q1IZLwL288u8cHBxJsCy6qLkxbkXq/s6Q44f1yqCNwN1FfyQzbrupHLObyqZ5s9iWW37TQMwTcCxtW0lpg==

JOSE GONZALO GONZALEZ RODRIGUEZ | Fecha:2023-10-06 11:03:15 | Firmante

q4gQoU06gRc+Rbrb1dFS5mTThR22sJk2kWhDLfK+UISV69FzXmktCylhSnQbs7wermG4r32jmc9g86zL5kbcw9ybh+HXGpljQScz0oEYOwFAG3y2aF3byjpiygej4DhJxZvDVRHYa quCHqnFUKUZYq82CSvZXPiEe+wmbcnVhBOLrv7wvO7CYQ5nyv61pYBBh8Gu1vuiHBvt+XNA2sLORkff030RDFdzJf7v7qqwDI7t/HnZPc9hzNEXzUnELKfcAjci/PjUFXymRikdP YAItiPt0fHS+8oI95/eqB7HsdkyYJYN298Pfd7eb5pPHRYTOOLqzFmr9ludkXisJA==

ISAI ROSALES CADENA | Fecha:2023-10-23 11:08:47 | Firmante

Pbv4cG49ZfxG1OIFGyUNLjrS8AUDsAeXD9XreA+xMSGQd/b1a+JtUilxWZdSaEP5z+Dc/oreSs1j0zGl1jfstjx1fUEY6Wdn2ztMOJqMweiQawX+xRFLm1v+tHhO8Y8xn3SPjZEv/2+qJ/B3llc/FvH1HVXwM4s581xWniQNDvrm0COEAXZ8ubCqmoKXge/zw2ncXrMAJ0H0NRH4PXf17htlUnYnHaqgGc/OfgjkSlb9KyconiZLwYmsDdZRID/2Cs813P7FWM/dp3ZuMecMjNizw4xRku1ziLBCeljDxiGfEpkBRlq7Qydb2URV1Ut1N7IQhWcn/Z/Af9fzIEZQ==

MARYNA VASILIVNA VLASOVA | Fecha:2023-10-24 14:24:46 | Firmante

IM2U3k5QhmgM4N8SttAs/FIVNaDWQUMCngtW+sWESyIrMCuOdV9Xilz/GmZ7aFPwf2H0h28JA2N59AOCJkGNr3xgvcgDCUq/Tr7YSxbybn52VepMT01+glLt7676F6MhyR6a6L+ROQurGJtz2MQoHNJYADt3JfEGIJ89No/apfHaexaAlz0Rtcu8KDtq+UAEDA8TZUz6bn3rZSL/8lySkil3zxKsl6m/hAKEYHeyq5GyQq20RkPpn/r46KdULnxr7ryx53NykJmKMB/gBZqZj1NtuVf75X4qQD+brqoG0+rhhV5ytdkdnwODCU0Hr2GM69dpYzStEaa+zT2HZDQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



xDNTyZEpX

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/q5XyqvvdKynyMivQ8tP2MwNvV0t0SOv>

