



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA**

---

---

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES  
COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA 6061  
REFORZADOS CON PARTÍCULAS CERÁMICAS  
MEDIANTE METALURGIA DE POLVOS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTAN  
HERRERA PÉREZ ESTEFANY  
ZARATE TREJO OSCAR ARTURO**

**DIRECTORA DE TESIS  
M. en I. MARÍA GABRIELA GONZÁLEZ FLORES**

**CDMX**

**AÑO 2021**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: Profesor: MARÍA GABRIELA GONZÁLEZ FLORES**

**VOCAL: Profesor: VICTOR ANTONIO ARANDA VILLADA**

**SECRETARIO: Profesor: IGNACIO ALEJANDRO FIGUEROA VARGAS**

**1er. SUPLENTE: Profesor: HECTOR ISRAEL QUIROGA HERRERA**

**2° SUPLENTE: Profesor: JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA**

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO “D” DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA METALÚRGICA.**

## **ASESOR DEL TEMA:**

**M. en I. MARÍA GABRIELA GONZÁLEZ FLORES**

## **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**Dr. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA**

## **SUSTENTANTE (S):**

**HERRERA PÉREZ ESTEFANY**

**ZARATE TREJO OSCAR ARTURO**

## Índice

Resumen.....	12
Capítulo 1 .....	13
Introducción.....	13
1.1    Requerimiento para la Selección de Materiales.....	13
1.2    Demandas del Mercado.....	15
1.3    Aplicaciones de los Materiales Compuestos de Matriz Metálica.....	16
1.4    Ventajas y Limitaciones.....	17
1.5    Problemática Actual.....	19
1.6    Hipótesis.....	20
1.7    Objetivos.....	21
1.7.1    Objetivo General.....	21
1.7.2    Objetivos Particulares.....	21
Capítulo 2.....	22
Marco Teórico.....	22
2.1    Materiales Compuestos.....	22
2.1.1    Aleaciones de Aluminio como Matriz Metálica.....	24
2.1.2    Procesamiento.....	26
2.2    Proceso de Fase Líquida.....	29
2.3    Proceso de Fase Líquida.....	32
2.3.1    Métodos de Producción de Polvos.....	33
2.3.2    Atomización.....	33
2.3.3    Atomización por Gas (Inerte o Aire).....	33
2.3.4    Caracterización de Polvos.....	34
2.3.4.1    Morfología de Partícula.....	34
2.3.4.2    Densidad Aparente y Densidad Real.....	35
2.3.4.3    Velocidad de Flujo.....	36
2.3.5    Mezclado de Polvos.....	36
2.3.6    Compactación.....	36
2.3.6.1    Compactación con Presión.....	37
2.3.6.1.1    Presión aplicada en una dirección y dos direcciones.....	37
2.3.6.2    Comportamiento del Polvo en la Compactación.....	37
2.3.6.3    Lubricación.....	38

2.4	Sinterización.....	38
2.4.1	Mecanismos de Sinterización.....	39
2.5	Técnicas de Caracterización Microscópica.....	41
2.5.1	Microscopía Óptica.....	41
2.5.2	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	42
2.6	Métodos de Cuantificación de Partículas.....	43
2.6.1	Método del Cuadrante.....	44
2.6.2	Método del Camino Libre.....	44
2.6.3	Método de la Distancia entre el Vecino más Cercano.....	44
2.6.4	Método de Análisis de Homogeneidad.....	45
2.7	Propiedades Tribológicas.....	46
2.7.1	Desgaste.....	46
2.7.1.1	Ensayo de Desgaste.....	47
2.7.1.2	Curva de Desgaste-Carga Aplicada.....	48
2.8	Propiedades Mecánicas.....	49
2.8.1	Ensayo de Compresión.....	49
Capítulo 3.....		51
Desarrollo Experimental.....		51
3.1	Propiedades Mecánicas.....	51
3.1.1	Densidad Aparente.....	52
3.1.2	Densidad Real.....	52
3.1.3	Velocidad de Flujo.....	52
3.2	Mezclas de Polvos.....	53
3.3	Compactación.....	53
3.4	Sinterización.....	54
3.5	Caracterización y Preparación Microestructural.....	54
3.6	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	55
3.7	Cuantificación y Distribución de Refuerzo Cerámico.....	55
3.8	Ensayo de Desgaste.....	56
3.9	Ensayo de Compresión.....	57
Capítulo 4.....		58
Resultados y Análisis de Resultados.....		58
4.1	Caracterización de Polvos.....	58

4.1.1	Análisis Químico.....	58
4.1.2	Densidad Aparente, Densidad Real y Velocidad de Flujo.....	58
4.2	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	60
4.2.1	Microanálisis de Energía Dispersiva por Rayos X (EDX).....	67
4.3	Mezclado, Compactación y Sinterización. ....	69
4.3.1	Mezclado. ....	69
4.3.2	Compactación.....	69
4.3.3	Sinterización. ....	70
4.4	Microscopía Óptica.....	73
4.4.1	Cuantificación y Distribución de Partículas en la Matriz.....	84
4.5	Ensayo de Desgaste. ....	90
4.6	Ensayo de Compresión. ....	98
Capítulo 5	.....	102
Conclusiones.	.....	102
Anexos	.....	104
Anexo A. 1.	Cálculo de los distintos porcentajes de refuerzo. ....	104
Anexo A.2.	Cálculo para obtener la $\beta$ promedio mediante el método de análisis de homogeneidad.....	105
Anexo B.	Uso del software de análisis (Image Pro Plus) para la cuantificación de partículas en la matriz. ....	106
Capítulo 6	.....	110
Bibliografía.	.....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1 Producción de las distintas familias de materiales en función al precio por unidad de volumen y densidad (propiedad del software CES edupack 2019). .....	13
Figura 1.2 Características importantes en el mercado mundial de los materiales compuestos <sup>4</sup> . .....	14
Figura 1.3. Demanda Global de los Materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC's) <sup>6</sup> . .....	16
Figura 1.4 Límite elástico de las distintas aleaciones en función de la densidad propiedad del software CES edupack 2019).....	18
Figura 1.5. Comportamiento de los distintos materiales en función del esfuerzo a la fatiga y corrosión (propiedad del software CES edupack 2019). .....	19
Figura 2.1. Estructura de un compuesto natural (la madera de árboles) <sup>14</sup> . .....	22
Figura 2.2 Clasificación de los materiales compuestos por los distintos tipos de matrices. ....	23
Figura 2.3 Clasificación del tipo de refuerzo por la forma que presentan.....	24
Figura 2.4 Procesos de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica empleados en los últimos 10 años <sup>7</sup> . .....	27
Figura 2.5. Diagrama de los procesos para la fabricación de materiales compuestos base aluminio.....	28
Figura 2.6. Diagrama del equipo utilizado por el proceso de fundición por agitación <sup>24</sup> . ....	29
Figura 2.7. Esquema del proceso de utilización de aire para la producción de polvos de aluminio <sup>31</sup> . .....	34
Figura 2.8. Morfología de las partículas dependiendo su método de producción <sup>34</sup> . .....	35
Figura 2.9. Equipo de Hall utilizado para determinar la densidad aparente <sup>35</sup> .....	35
Figura 2.10. Distribución de las partículas debido al proceso de mezclado <sup>34</sup> . .....	36
Figura 2.11. Secuencia de la compactación de los polvos mediante sus cuatro fases <sup>36</sup> ... ..	37
Figura 2.12. Compactación en una dirección y dos direcciones <sup>36</sup> . .....	37
Figura 2.13 Esquema representativo de las fases del proceso de sinterización, (1) unión de partículas y formación de puntos de contactos, (2) crecimiento de cuellos, (3) reducción del tamaño de poro y (4) crecimiento de límite de grano <sup>34</sup> . .....	39
Figura 2.14 Gráfica representativa entre el tiempo, temperatura de sinterización y la densidad <sup>34</sup> .....	39
Figura 2.15 Representación esquemática de los mecanismos de sinterización en un sistema de 3 partículas, 1) Difusión de superficie, 2) Difusión de red (desde la superficie), 3) Transporte de vapor, 4) Difusión de límite de grano, 5) Difusión de red (límite de grano) y 6) Flujo plástico <sup>39</sup> . .....	41
Figura 2.16 Esquema interno del microscopio óptico <sup>45</sup> .....	42

Figura 2.17. Esquema interno del microscopio electrónico de barrido <sup>45</sup> .....	42
Figura 2.18 Ilustración esquemática del método de análisis para cuantificación de distribución en el material compuesto <sup>46</sup> .....	45
Figura 2.19. Pruebas de desgaste abrasivo, (a) deslizamiento de disco, (b) deslizamiento rectilíneo, (c) deslizamiento de tambor y (d)deslizamiento de rueda de goma según la ASTM G65 <sup>49</sup> . .....	47
Figura 2.20 Curva de pérdida de desgaste en función de su tiempo con las etapas importante <sup>53</sup> .....	48
Figura 2.21 Curva esfuerzo-deformación con los puntos críticos, donde (A) es el límite elástico o de proporcionalidad, (B) esfuerzo a la cedencia y donde se inicia la deformación plástica, (C) resistencia a la tensión y (D) esfuerzo a la fractura <sup>56</sup> . .....	49
Figura 2.22 Diagrama esquemático del esfuerzo de compresión-deformación. ....	49
Figura 3.1 Esquema propuesto para la medición de la densidad aparente y velocidad de flujo. ....	52
Figura 3.2. Esquema del equipo utilizado para la mezcla de polvos. ....	53
Figura 3.3. Matriz cilíndrica empleada para obtener las piezas compactadas .....	53
Figura 3.4 Mufla de resistencia utilizada para el proceso de sinterización.....	54
Figura 3.5. Imagen del material compuesto Al/6061-%SiC dividida en 64 cuadrantes a 100x para determinar la cuantificación de partículas. ....	55
Figura 3.6 Clasificación de los niveles de homogeneidad (grado de distribución) para materiales compuestos basados en rangos del índice $\beta_{index}$ . ....	56
Figura 3.7. Sistema utilizado en el ensayo de desgaste tipo disk-pin-drum.....	56
Figura 3.8. Máquina de compresión (marca MTS, modelo 661.23B). ....	57
Figura 4.1. Micrografías SEM de los polvos de aluminio 6061 (a y b), carburo de silicio SiC (c y d) y, carburo de tungsteno WC (e y f).....	61
Figura 4.2. Medición del diámetro de partícula de Al/6061 mediante: a) diámetro medio y, b) asumiendo forma esférica.....	63
Figura 4.3. Micrografías de los a) polvos de aluminio 6061; b) relación de aspecto; c) diámetro medio, d) redondez de las partículas.....	64
Figura 4.4. Micrografías de los a) polvos de carburo de silicio; b) relación de aspecto; c) diámetro medio, d) redondez de las partículas.....	65
Figura 4.5. Micrografías de los a) polvos de carburo de tungsteno; b) relación de aspecto; c) diámetro medio, d) redondez de las partículas.....	66
Figura 4.6. a) Micrografía EDX de las partículas de aluminio 6061; b) Espectro 1 realizado a la partícula del polvo de aluminio 6061.....	67
Figura 4.7. a) Micrografía EDX de las partículas de carburo de silicio; b) Espectro 1 realizado a la partícula de carburo de silicio.....	68



Figura 4.8. a) Micrografía EDX de las partículas de carburo de tungsteno; b) Espectro realizado a la partícula de carburo de tungsteno.....	68
Figura 4.9. Esquema del equipo para el mezclado de los polvos de aluminio con los respectivos refuerzos cerámicos.....	69
Figura 4.10. Probetas obtenidas del proceso de compactación del material compuesto base aluminio reforzado con a) Carburo de Silicio y b) Carburo de Tungsteno. ....	70
Figura 4.11 Microestructuras de las piezas correspondientes a la sinterización de Al/6061 (A:500°C-90 min., B: 550°C-90 min., C: 500°C-120 min., D: 550°C-120min., E: 500°C-150min., y F:550°C-150min.....	72
Figura 4.12 Microestructuras representativas de los materiales compuestos a) Al6061/SiC <sub>p</sub> y b) Al6061/WC <sub>p</sub> . Se presenta en un corte transversal de las muestras obtenidas a 40x y un 2% en peso.....	74
Figura 4.13 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/SiC <sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte transversal de las muestras obtenidas a 100x; a)1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.....	76
Figura 4.14 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/SiC <sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte transversal de las muestras obtenidas a 100x; a)1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.....	77
Figura 4.15 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/SiC <sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte longitudinal de las muestras obtenidas a 100x; a)1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.....	78
Figura 4.16 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/SiC <sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte longitudinal de las muestras obtenidas a 100x; a)1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.....	79
Figura 4.17 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/WC <sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte transversal de las muestras obtenidas a 100x; a)1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.....	80
Figura 4.18 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/WC <sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte transversal de las muestras obtenidas a 100x; a)1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.....	81
Figura 4.19 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/WC <sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte longitudinal de las muestras obtenidas a 100x; a)1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.....	82
Figura 4.20 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/WC <sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte longitudinal de las muestras obtenidas a 100x; a)1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.....	83
Figura 4.21 Gráfica de barras en función de $\beta$ para el material compuesto reforzado con carburo de silicio.....	86
Figura 4.22 Gráfica de barras en función de $\beta$ para el material compuesto reforzado con carburo de tungsteno.....	88

Figura 4.23 Gráfica de barras del promedio de partículas en el área total para los refuerzos cerámicos carburo de silicio y carburo de tungsteno en función de los distintos cortes. ....	89
Figura 4.24. Comportamiento convencional de un material durante un ensayo de desgaste <sup>53</sup> .....	90
Figura 4.25. Velocidad de desgaste en función de la distancia recorrida para las muestras de Al6061/%SiC <sub>p</sub> .....	91
Figura 4.26. Velocidad de desgaste en función de la distancia recorrida para las muestras de Al6061/%WC <sub>p</sub> .....	93
Figura 4.27. Probetas obtenidas del ensayo de desgaste para los Al/6061-1%SiC <sub>p</sub> y Al/6061-2%SiC <sub>p</sub> .....	94
Figura 4.28 Velocidad de desgaste en función de la distancia recorrida en materiales compuestos reforzados con distintos porcentajes de partículas cerámicas de SiC y WC; A) 1%, B) 2%, C) 3%, D) 4% y E)5%.....	96
Figura 4.29. Curvas esfuerzo-deformación del ensayo de compresión para el material compuesto Al-6061 con los distintos refuerzos cerámicos SiC y WC con sus respectivas fracciones en peso (A; Al-6061, B;1%, C:2%, D:3%, E:4% y F:5%).....	101
Figura B.1.1 Calibración del analizador de imágenes. ....	106
Figura B.2. Selección de imágenes. ....	106
Figura B.3. Cambio a escala de grises. ....	107
Figura B.4. Contraste aplicado a imagen para determinar la cuantificación.....	107
Figura B.5. División por 64 cuadrantes para determinación de betas. ....	108
Figura B.6 Conteo de partículas mediante el uso del software.....	108

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1 Componentes fabricados por materiales compuestos base aluminio en la industria. ....	17
Tabla 1.2 Ventajas y limitaciones de las propiedades de los materiales compuestos. ....	17
Tabla 2.1. Sistema de nomenclatura para aleaciones de aluminio para trabajo mecánico <sup>21</sup> . ....	25
Tabla 2.2 Sistema de nomenclatura para aleaciones de aluminio por fundición <sup>21</sup> . ....	25
Tabla 2.3 Aleaciones importantes utilizadas en la fabricación de materiales compuestos base aluminio <sup>21</sup> . ....	26
Tabla 2.4. Clasificación de los métodos de producción de materiales compuestos en función de sus principales características <sup>16</sup> . ....	27
Tabla 2.5. Problemáticas del método de fabricación de MMC's por fundición por agitación <sup>8,18,19</sup> . ....	30
Tabla 2.6. Ventajas y desventajas del tamaño de las partículas empleadas en la fabricación de MMC's <sup>20</sup> . ....	31
Tabla 2.7. Mecanismos de sinterización <sup>34</sup> . ....	40
Tabla 3.1 Composición nominal de la aleación Al/6061. ....	51
Tabla 3.2 Composición nominal del refuerzo cerámico SiC <sub>p</sub> . ....	51
Tabla 3.3. Composición nominal del refuerzo cerámico WC <sub>p</sub> . ....	51
Tabla 3.4. Condiciones de temperatura y tiempo de sinterización. ....	54
Tabla 3.5. Dimensiones iniciales de las probetas de compuestos base Al/6061. ....	57
Tabla 4.1 Composición química de la aleación 6061. ....	58
Tabla 4.2. Valores promedio de la densidad aparente, densidad real, velocidad de flujo y densidad teórica. ....	59
Tabla 4.3. Caracterización de las partículas de acuerdo a su aspecto, diámetro medio y redondez. ....	66
Tabla 4.4. Variación del tamaño de grano y área de grano de la microestructura en función del tamaño de partícula para SiC y WC. ....	74
Tabla 4.5 Valores promedio de las distintas $\beta$ para cortes longitudinales y transversales para el refuerzo de carburo de silicio. ....	85
Tabla 4.6 Valores promedio de las distintas $\beta$ para cortes laterales y transversales para el refuerzo de carburo de tungsteno. ....	86
Tabla 4.7 Valores obtenidos de la muestra de sinterización del módulo de Young (GPA), UTS y modulo específico de la aleación monolítica 6061. ....	98
Tabla 4.8 Valores obtenidos de los materiales compuestos Al/6061-%WC <sub>p</sub> del módulo de Young (GPA), UTS (MPa) y módulo específico. ....	99

Tabla 4.9 Valores obtenidos de los materiales compuestos Al/6061-%SiC<sub>p</sub> del módulo de Young (GPa) y UTS(MPa). ..... 100

Tabla A.1 Número total de partículas para Al/6061-1%SiC<sub>p</sub>. ..... 105

## **Resumen.**

La demanda de los materiales compuestos de matriz metálica en los últimos 20 años ha crecido considerablemente debido a su buen desempeño y excelentes propiedades. Resaltando por su baja densidad, bajo costo y alta resistencia a la corrosión, las aleaciones base aluminio reforzadas con partículas de carburo de silicio cumplen cabalmente la relación bajo peso/alta resistencia, lo que habilita a estos materiales como sustitutos de los materiales convencionales de ingeniería.

El proceso de fabricación de materiales compuestos se divide principalmente en vía fase sólida y fase líquida. El proceso fase líquida más importantes es la fundición por agitación o método del vórtice, mientras que la metalurgia de polvos lo es vía sólida. Estos dos procesos son los más utilizados debido a la complejidad para obtener piezas que cumplan ciertos requerimientos en relación a costo-beneficio en aleaciones monolíticas base aluminio. Actualmente la producción se da por fundición por agitación, pero presenta ciertos problemas que la metalurgia de polvos ha ido solucionando.

El presente trabajo experimental tiene como propósito estudiar y analizar el comportamiento mecánico y tribológico de materiales compuestos reforzados con dos clases de refuerzo cerámico particulado y a distintos niveles de reforzamiento. Un análisis de la interacción matriz-cerámico, así como la búsqueda de las condiciones ópticas de trabajo en el proceso de metalurgia de polvos que reflejen un bajo costo económico y productivo son parte de los alcances del presente trabajo.

El primer capítulo detalla el panorama actual de los materiales compuestos de matriz metálica fabricados por metalurgia de polvos, explicando mediante selección de materiales los requerimientos a cumplir, así como ventajas y limitaciones en función de las aplicaciones. El segundo capítulo, engloba una explicación más precisa de las aleaciones base aluminio, así como los tópicos más relevantes en los materiales compuestos, detallando los procesos más importantes de fabricación, caracterización y estudio de las propiedades mecánicas y/o tribológicas. El capítulo 3 muestra la metodología para el desarrollo del presente trabajo, así como las variables importantes. En el capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos y su discusión.

## Capítulo 1

### Introducción.

La importancia de la selección de los materiales en los últimos años ha generado la investigación e innovación de nuevos materiales que tengan mejores propiedades físicas, químicas y mecánicas, pero de bajo peso<sup>1</sup>. Como se observa en la figura 1.1, la familia de los metales y aleaciones presenta una alta relación de precio por unidad de volumen, así como los materiales cerámicos. El crecimiento de los materiales compuestos ha ido en aumento debido a los requerimientos ingenieriles; su preferencia sobre los materiales convencionales se debe a que el costo de producción solo se incrementa ligeramente y ofrecen mayor ligereza lo que representa un ahorro en términos energéticos en industrias como la automotriz y aeroespacial<sup>1</sup>.

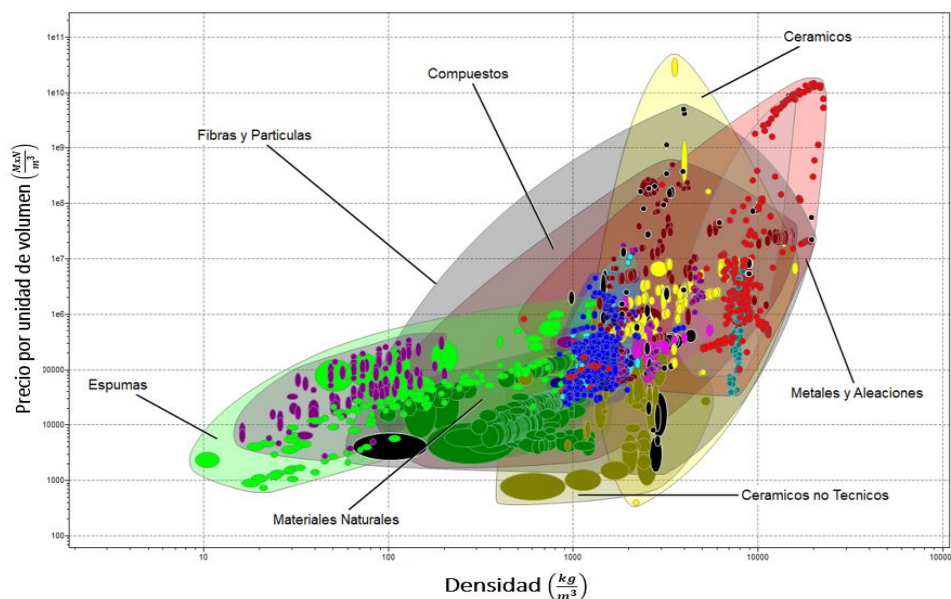


Figura 1.1 Producción de las distintas familias de materiales en función al precio por unidad de volumen y densidad (propiedad del software CES edupack 2019).

### 1.1 Requerimiento para la Selección de Materiales.

La selección del mejor material debe tener en cuenta el requerimiento de la industria y la capacidad de elaboración, así como la necesidad del producto en el mercado, que va desde las características esenciales como tamaño, forma, acabado, costo, huella ambiental, funcionamiento, calidad y una fácil fabricación que van asociadas con las propiedades a mejorar. Deben incluir una buena apariencia, fácil fabricación, bajo costo del material y un buen rendimiento.<sup>2,3</sup>

Los factores que determinan la selección de materiales es determinar la necesidad de la industria que debe estar enfocada en el requerimiento, capacidad y características del material compuesto para una selección en base a su funcionalidad, costo, comportamiento, tecnología de producción, proceso de producción y diseño de componentes.<sup>2,3</sup>

Los materiales compuestos de matriz metálica (MMC's) han ganado popularidad en las últimas décadas y son ampliamente utilizados en distintas aplicaciones ingenieriles. Uno de los métodos de producción de materiales compuestos más empleados es la metalurgia de polvos, donde el mercado mundial de los componentes fabricados por esta vía ha tenido un crecimiento desde el año 1993 hasta la actualidad. El mercado se valora en millones de dólares y se prevé que tenga un crecimiento aun mayor para el 2025. La demanda ha ido creciendo en la industria aeroespacial, automotriz, energía limpias y otras aplicaciones ingenieriles (equipo de defensa para la industria nuclear y marina).

Se proyecta que el tamaño del mercado global de compuestos de matriz metálica alcanzará los 10.8 kilotoneladas para 2021, creciendo a una tasa compuesta anual superior al 6% durante el período de pronóstico. El uso de compuestos de matriz metálica en la fabricación de componentes automotrices es uno de los principales impulsores del mercado, como se explica en la figura 1.2.

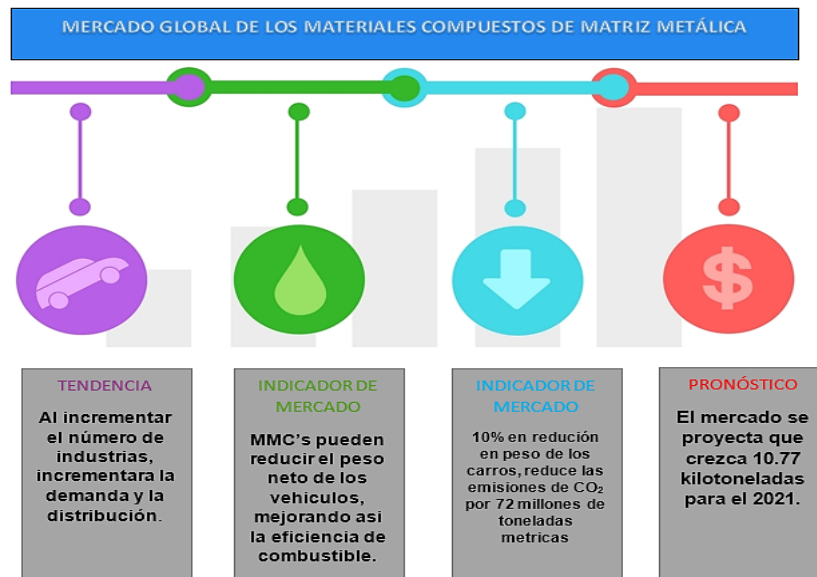


Figura 1.2 Características importantes en el mercado mundial de los materiales compuestos<sup>4</sup>.

## **1.2 Demandas del Mercado.**

El mercado global de MMC's está consolidado, con seis proveedores prominentes que representan más de dos tercios de los ingresos generales, lo que lleva a una intensa competencia en el mercado. Para satisfacer la creciente demanda de las industrias de transporte y aeroespacial, se espera que los principales proveedores formen empresas conjuntas y asociaciones durante el período de pronóstico. Los proveedores también están expandiendo activamente sus líneas de producción existentes y están construyendo nuevas instalaciones de producción para satisfacer la mayor demanda, lo que lleva a una sólida posición en el mercado global<sup>3</sup>.

### **a) Principales vendedores globales de MMC's**

- a) 3M: Opera a través de cuatro segmentos comerciales operativos: industrial, seguridad y gráficos, electrónica y energía, y otros. La compañía ofrece MMC como compuestos de aluminio, que se utilizan en alambres, tubos, anillos y varillas continuos. Estos productos son ligeros, resistentes a la corrosión, tienen alta resistencia longitudinal y alta rigidez.
- b) Tecnologías CPS: Ofrece soluciones de materiales avanzados que tienen aplicaciones en trenes de alta velocidad, turbinas eólicas y automóviles eléctricos. Suministra MMC para su uso en controladores de motor en trenes eléctricos de alta velocidad, vehículos híbridos.
- c) Metales Sinterizados GKN: Suministra componentes de metal en polvo de precisión para vehículos comerciales, césped y jardín, electrodomésticos y mercados de herramientas eléctricas.

### *Los MMC's en el mundo*

Las principales regiones con industrias en MMC's son:

- Norteamérica
- Europa
- China
- Japón

Tres mercados en particular que tienen un fuerte potencial de crecimiento son México, India y los Emiratos Árabes Unidos. La relativa proximidad de México a los productores de Estados Unidos, hace que los productores estadounidenses sean más competitivos en precios que otros competidores extranjeros, lo que reduce los costos de transporte y comunicación maximiza las ventajas del servicio como los tiempos de envío más cortos. La demanda de los materiales compuesto ha crecido en los últimos años como se observa en la figura 1.3. En los últimos años las ventas globales han ascendido a más de 35 mil millones de dólares



teniendo como principal aleación los polvos de aluminio, abarcando el mercado de 75-85% de aleaciones no ferrosas en la industria automotriz<sup>2,3,5</sup>.

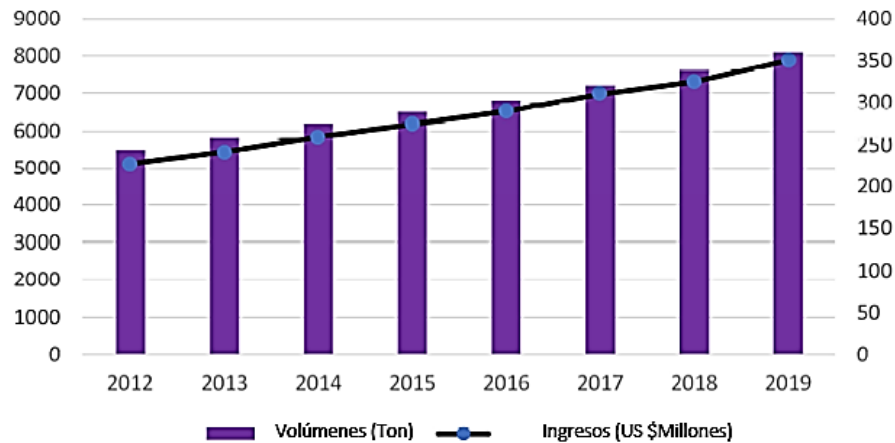


Figura 1.3. Demanda Global de los Materiales Compuestos de Matriz Metálica (MMC's)<sup>6</sup>.

El crecimiento de los componentes automotrices por metalurgia de polvos dependerá de obtener mejoras en las propiedades en comparación con los materiales ingenieriles convencionales. Se proyecta que el mercado de transporte terrestre crecerá a un ritmo más alto debido a la demanda de materiales basados en MMC's en aplicaciones automotrices y ferroviarias. El mercado es significativo debido a la excelente funcionalidad en su considerable relación bajo peso/ alta resistencia<sup>7</sup>.

### 1.3 Aplicaciones de los Materiales Compuestos de Matriz Metálica.

El mercado de los MMC's en los últimos años se ha ampliado debido a la gran funcionalidad y numerables aplicaciones en comparación con los materiales tradicionales. Aplicaciones dentro de la industria automotriz son los pistones, flechas, discos de frenos y blocks para cilindros de combustión interna. Dentro de las aplicaciones mencionadas, los pistones de motor y los discos de freno son los componentes automotrices de mayor aplicación en la industria de los materiales compuestos y cuyo desarrollo por parte de las empresas automotrices como Ford y Toyota, se llevó a cabo en los años 90<sup>7</sup>.

El consumo de material compuesto ha aumentado significativamente en el sector aeroespacial el cual recurre cada vez más a materiales compuestos por su bajo peso y alta resistencia, baja conductividad eléctrica y durabilidad. Es uno de los mercados más importantes en aviones comerciales, las naves militares, helicópteros, y las naves espaciales hacen un uso sustancial de materiales reforzados. Durante la década de 1990, los aviones contenían solo del 5 al 6 por ciento de los materiales compuestos.

Hoy, sin embargo, alrededor del 50% de los materiales empleados en la fabricación de aviones civiles son compuestos, así como la fabricación de cuadros de bicicletas, satélites, paneles solares, dispositivos microelectrónicos y componentes para motores aeroespaciales son algunas otras de las muchas aplicaciones en las que encontramos los MMC's, como se observa en la tabla 1.1.<sup>7,8,9</sup>

Tabla 1.1 Componentes fabricados por materiales compuestos base aluminio en la industria.

<b>Industria</b>	<b>Aplicaciones</b>
Industria aeroespacial	Estructura espacial, antenas turbocargadores, impulsores, propelas, estructuras de helicópteros y satélites
Industria automotriz	Pistones, discos de freno, rotores, tambores, monoblocks
Industria electrónica	Envoltentes, microcircuitos, paneles solares
Industria deportiva	Cuadros de bicicletas, raquetas de tenis

### **Ventajas y Limitaciones.**

Los materiales compuestos han evolucionado año con año en cuestión de diseño para la búsqueda de nuevos componentes de bajo peso y mejor rendimiento. A partir de la sustitución de aleaciones metálicas convencionales, los MMC's han generado gran interés por la comunidad científica debido a una mejora en sus propiedades y su enorme interés en la producción de componentes. Las ventajas y limitaciones de estos materiales compuestos de matriz metálica se presentan en la tabla 1.2<sup>5,10,11</sup>.

Tabla 1.2 Ventajas y limitaciones de las propiedades de los materiales compuestos.

<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
Rigidez y capacidad de amortiguación.	Homogeneidad de propiedades.
Resistencia a la fatiga.	Aglomeración de partículas.
Baja densidad.	Dificultad de lograr una buena distribución.
Resistencia al desgaste y la abrasión.	Defectos superficiales principalmente la porosidad o rechupes.
Alta tenacidad y estabilidad dimensional.	Dificultad para operaciones secundarias (maquinado).
Buena resistencia a la corrosión.	No presentan un buen acabado superficial.
Conductividad térmica y eléctrica.	Limitación del mercado.
Aislamiento térmico y resistencia altas temperaturas.	Altos costos de producción (dependiendo del tipo de refuerzo).
Bajo coeficiente de expansión térmica.	

La relación bajo peso/alta resistencia ha sido clave para la innovación de estos materiales y sus aplicaciones, es decir, es necesario un excelente rendimiento del material bajo cierta carga y que además sea lo suficientemente ligero. Como se observa en la figura 1.4, los materiales compuestos base aluminio reforzados con partículas de SiC (AIMC's/SiC<sub>P</sub>) producidos por metalurgia de polvos presentan un límite elástico mayor en comparación con aquellos fabricados por fase líquida y aquellos sin reforzar lo que les asegura un lugar en la industria automotriz y aeroespacial<sup>10,11</sup>.

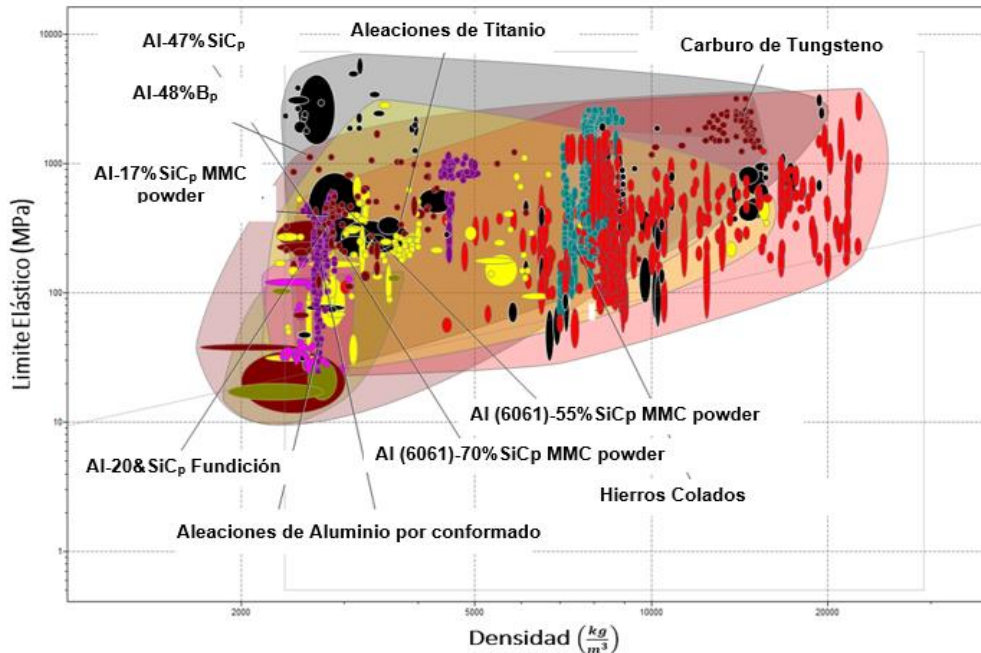


Figura 1.4 Límite elástico de las distintas aleaciones en función de la densidad propiedad del software CES edupack 2019).

Los AIMC's/SiC<sub>P</sub> se destacan también por tener alta resistencia a la corrosión en comparación con el acero y el hierro, tal como se observa en la figura 1.5. Los materiales compuestos alcanzan además los mismos ciclos de fatiga que muchos aceros los cuales se encuentran entre los materiales más ocupados en la industria automotriz. La ventaja de los MMC's es que poseen mayor resistencia a la corrosión aunada a buena resistencia mecánica lo que aumenta la vida útil del componente fabricado con este material<sup>10,11</sup>.

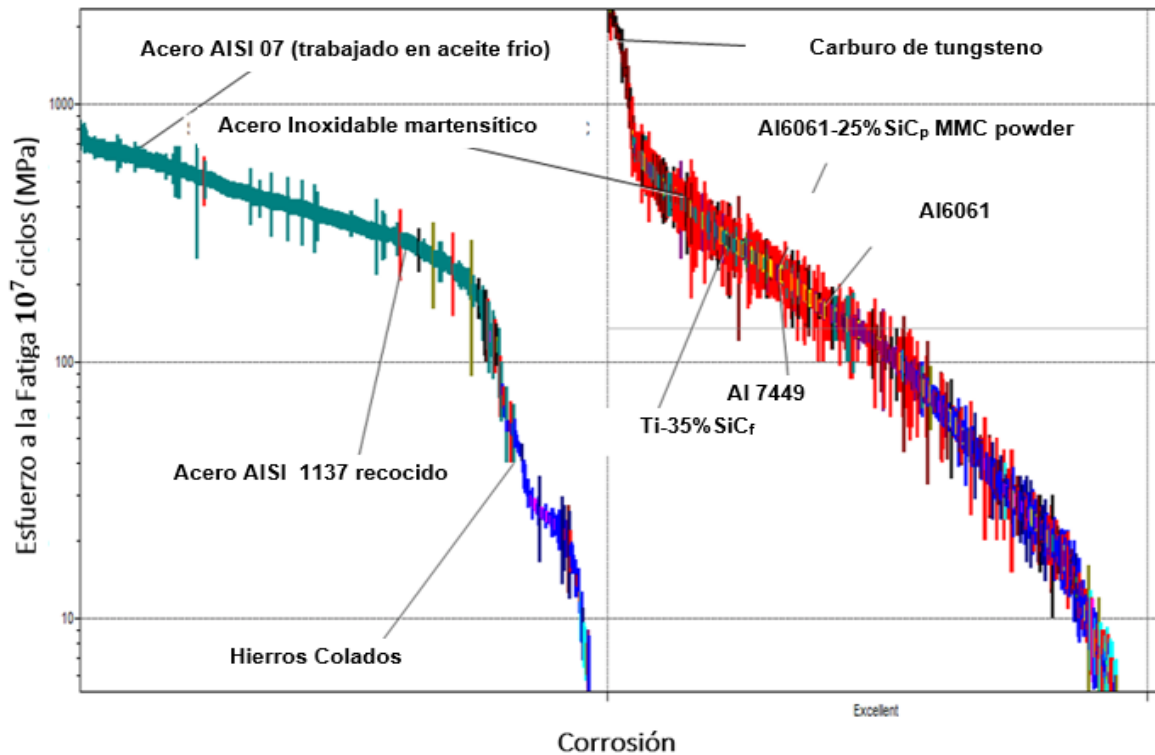


Figura 1.5. Comportamiento de los distintos materiales en función del esfuerzo a la fatiga y corrosión (propiedad del software CES edupack 2019)

La necesidad de obtener mejores materiales ha llevado a la mejora significativa en la eficiencia estructural tomando como base la reducción de peso y, por ende, el aumento de propiedades específicas. Varios estudios han concluido que por cada libra ahorrada utilizando materiales compuestos base aluminio o titanio se alcanza un ahorro de hasta \$250 dls aproximadamente obteniendo mayor eficiencia y una menor contaminación además de que, un ahorro del 10% de peso estructural aumenta un 4% la carga útil.<sup>10,11</sup>

#### 1.4 Problemática Actual.

Los materiales compuestos de matriz metálica están segmentados en materiales compuestos de aleaciones de base aluminio, magnesio, titanio y otras aleaciones. Los MMC's de aluminio son lo que tienen la mayor participación en el mercado en términos de valor y volumen debido a sus mejores propiedades y su costo de producción relativamente bajo. Según el tipo de refuerzo, el mercado está segmentado en continuo, discontinuo y partículas. Se proyecta que el mercado discontinuo reforzado de MMC's representará la mayor parte, en términos de volumen y valor, durante el período de pronóstico en los últimos 10 años.

El alto rendimiento de las MMC's base aluminio reforzados con carburo de silicio o carburo de tungsteno en la industria automotriz y aeroespacial ha ganado gran

interés debido a su bajo costo de producción. Sin embargo, al encontrarse muchos de estos sistemas aun en desarrollo, la falta de conocimiento sobre la tecnología de los MMC's está restringiendo su crecimiento. Estudios de mercado y crecimiento han determinado que utilizar componentes fabricados por materiales compuestos puede reducir los requisitos de capital, disminución de costos de mantenimiento y permitir operaciones que de otro modo no serían factibles tanto técnicamente y financieramente.

La producción de materiales compuestos de matriz metálica por metalurgia de polvos constituye una vía alterna a la fundición muy provechoso debido a que los componentes obtenidos por esta ruta presentan una excelente relación entre propiedades-peso además de que, en términos generales, este proceso presenta un menor impacto energético y una menor huella ambiental. Un beneficio adicional de los MMC's por metalurgia de polvos es el nivel de reforzamiento el cual puede alcanzar hasta 80% en volumen<sup>11</sup>.

Si bien es cierto que mediante la metalurgia de polvos se alcanza un mayor reforzamiento, así como una mejor distribución del refuerzo en comparación con los componentes fabricados por fundición por agitación, el costo por producción es mayor. Estudios a desarrollar deberán enfocarse primeramente en la caracterización del sistema matriz-refuerzo que permita obtener un producto que cumpla con los requerimientos básicos a cumplir en un material compuesto de alta calidad: alta rigidez específica y resistencia al desgaste.

### **1.5 Hipótesis.**

En función de la problemática planteada y el panorama actual de los materiales compuestos se plantean las siguientes hipótesis.

- a) Los materiales compuestos de matriz metálica 6061 fabricados por metalurgia de polvos y reforzados con distintos porcentajes de carburo de silicio o carburo de tungsteno en forma de partículas, presentan una distribución homogénea de partículas.
- b) Los materiales compuestos de matriz metálica 6061 reforzado con partículas de carburo de tungsteno presenta las mejores propiedades mecánicas y tribológicas en comparación con aquellos compuestos reforzados con carburo de silicio.

## **1.6 Objetivos.**

### **1.6.1 Objetivo General.**

Determinar el nivel de reforzamiento y el tipo de refuerzo ( $\text{SiC}_p$  o  $\text{WC}_p$ ) que permite alcanzar mejores propiedades mecánicas y tribológicas en un material compuesto fabricado vía metalurgia de polvos.

### **1.6.2 Objetivos Particulares.**

- 1) Fabricar mediante metalurgia de polvos, un material compuesto de matriz metálica Al6061 con distintos niveles de reforzamiento empleando carburo de silicio o carburo de tungsteno como refuerzos.
- 2) Determinar las mejores condiciones de tiempo y temperatura de sinterizado.
- 3) Determinar el porcentaje obtenido y el índice de distribución de partículas mediante técnicas de cuantificación de refuerzos.
- 4) Caracterizar las partículas y piezas obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido y microscopía óptica.
- 5) Caracterizar tribológica y mecánicamente las piezas obtenidas mediante ensayos de desgaste y compresión.

## Capítulo 2.

### Marco Teórico

En este capítulo se describirá los antecedentes teóricos sobre los materiales compuestos, su clasificación con base al tipo de matriz y refuerzo, procesos de fabricación, caracterización microscópica, métodos de cuantificación, así como las propiedades mecánicas y tribológicas comúnmente requeridas en los materiales compuestos de matriz metálica.

### 2.1 Materiales Compuestos.

Los materiales compuestos se han definido como el conjunto de características y propiedades de distintos elementos tomados por separado. La historia de los materiales compuestos es tan antigua como la misma civilización humana; su presencia tanto en la naturaleza como en el cuerpo humano ha convertido a estos materiales en algo común de observar por lo que han pasado mucho tiempo desapercibidos. Por definición, un material compuesto es aquel material obtenido de la combinación de dos o más materiales con propiedades diferentes (eléctricas, mecánicas, térmicas y/o químicas), que esencialmente son insolubles entre ellos y que al combinarse dan como resultado mejores propiedades que las de los componentes individuales<sup>11,12,13</sup>.

En general, los Materiales Compuestos contienen dos componentes bien diferenciados: la matriz o fase continua y el refuerzo o fase discontinua; estos están unidos de forma física. La matriz es la fase en la que el refuerzo queda “embebido”; se puede clasificar como metálica, polimérica o cerámica. El refuerzo es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para conferir al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee; en la figura 2.1 se puede observar la distribución de ambos componentes<sup>11,12,13</sup>.

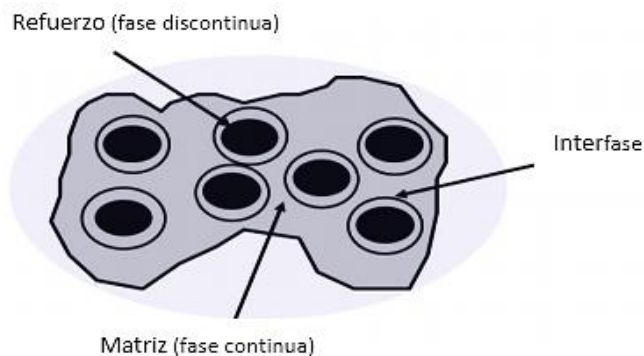


Figura 2.1. Estructura de un compuesto natural (la madera de árboles)<sup>14</sup>

La clasificación de los materiales compuestos se clasifica principalmente por el tipo de matriz (figura 2.2). Muchos de estos materiales comúnmente pueden ser aleaciones metálicas, cerámicos dopados y polímeros con aditivos<sup>11,12,13</sup>.

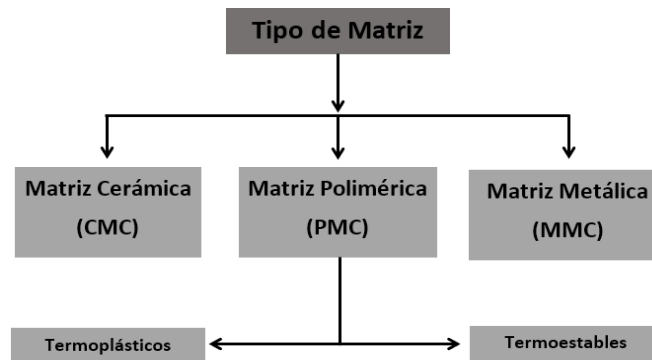


Figura 2.2 Clasificación de los materiales compuestos por los distintos tipos de matrices.

Los compuestos de matriz metálica (MMC), generalmente son aleaciones metálicas base aluminio, magnesio, hierro, cobalto, níquel y cobre. Generalmente están reforzados con una fase cerámica dispersa en forma de partículas o fibras (óxidos, carburos, nitruros, boruros) o metálica (plomo, tungsteno, molibdeno)<sup>7,11</sup>.

Los compuestos de matriz cerámica (CMC), son sólidos inorgánicos no metálico, principalmente reforzados con fibras incrustadas de otro material cerámico denominada una fase dispersa. Se han caracterizado por obtener resistencias elevadas, altas temperaturas y alta resistencia a compresión<sup>7,11</sup>.

Los compuestos de matriz polimérica (PMC) ordinariamente son fabricados con matrices termoestables (poliéster insaturado, UP; Epóxido, EP) o termoplásticas (policarbonato, PC; cloruro de polivinilo, nailon, poliestireno) reforzadas en forma de partículas, fibras largas o fibras cortas (whiskers) actuando como la fase dispersa donde el principal objetivo es una baja densidad<sup>7,11,15</sup>.

Como se ha mencionado previamente, el refuerzo actúa como la fase dispersa dentro de la matriz la cual confiere al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee. La clasificación del refuerzo es con base en la forma que presenta; las formas más comunes son partículas, fibras cortas (whiskers), fibras largas, hojas o plaquetas y hojuela<sup>7,10,11,15</sup>.

Los refuerzos más utilizados son las partículas y las fibras debido a que la mayoría tiene la ventaja de transferir mejor una carga aplicada a la matriz ya sea de forma uniaxial (fibras largas) o multiaxial (fibras cortas o partículas). La figura 2.3 muestra un diagrama de la clasificación de los refuerzos por su forma<sup>7,11,15, 16</sup>.



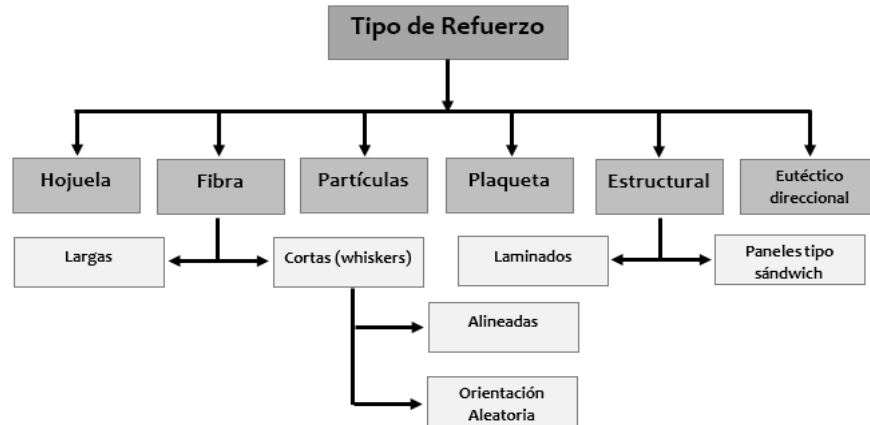


Figura 2.3 Clasificación del tipo de refuerzo por la forma que presentan.

En los últimos años, los materiales que han sustituido a materiales convencionales de ingeniería son los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas cerámicas de SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o SiO<sub>2</sub>. Existen otros tantos (Carbono, Grafito, B, BN, B<sub>4</sub>C, AlN y WC) que en los últimos años han sido objeto de estudio, aunque su desarrollo y crecimiento se ha limitado por su costo de producción relativamente alto<sup>7, 10, 15,17</sup>.

El proceso de selección del refuerzo cerámico implica que tanto este como la matriz monolítica alcancen una excelente unión que genere una buena compatibilidad matriz-refuerzo. Otros parámetros a considerar en la selección del refuerzo son<sup>8,18,19</sup>:

- a) Tamaño y forma del refuerzo
- b) Coeficiente de expansión térmica.
- c) Costo del refuerzo

### 2.1.1 Aleaciones de Aluminio como Matriz Metálica.

Las aleaciones de aluminio son los materiales más utilizados como matriz en la fabricación de los materiales compuestos debido a que junto al acero, es un material con un alto nivel de producción a nivel mundial (ocupa el segundo lugar) y posee un bajo precio comercial<sup>20,21</sup>.

La diferencia entre los compuestos de matriz de aluminio y las aleaciones de aluminio es que proporcionan propiedades superiores que no pueden lograrse con ningún material monolítico existente aunado a una gran producción, flexibilidad y bajo costo de producción<sup>21</sup>.

La American National Standards Institute (ANSI) y la Aluminium Association (AA) tienen una asignación para trabajo mecánico de cuatro dígitos (XXXX). El primer

dígito implica el grupo de la aleación y es determinado por el elemento de la aleación presente en mayor porcentaje (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Sistema de nomenclatura para aleaciones de aluminio para trabajo mecánico<sup>21</sup>.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Principales elementos de aleación.</b>
1xxx	Ninguno ( $\geq 99.0\%$ Al)
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg-Si
7xxx	Zn
8xxx	Aleaciones en desarrollo
9xxx	Sin uso

La asignación para fundición se asigna un dígito localizado a la derecha del punto decimal que indica si fue vaciada en molde (XXX.0) o vaciada directamente en lingote (XXX.1) como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Sistema de nomenclatura para aleaciones de aluminio por fundición<sup>21</sup>.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Principales elementos de aleación.</b>
1xx.x	Ninguno ( $\geq 99.0\%$ Al)
2xx.x	Cu
3xx.x	Si (Cu y Mg en pequeñas cantidades)
4xx.x	Si-M-Mn
5xx.x	Mg
6xx.x	Fuera de uso
7xx.x	Zn
8xx.x	Sn
9xx.x	Aleaciones en desarrollo

La American Society for Metals (ASM) por su parte, clasifica estas aleaciones según su tratamiento térmico<sup>20, 21</sup>.

- a) Aleaciones base aluminio obtenidas por conformado, las cuales algunas requieren tratamiento térmico para obtener excelentes propiedades como alta resistencia y excelente ductilidad.
- b) Aleaciones base aluminio obtenidas por conformado pero que no tratables térmicamente; las más importantes Al-Mg y Al-Mn. Generalmente son trabajadas en frío y su uso es limitado debido a una baja resistencia

- c) Aleaciones de fundición (Al-Si, Al-Cu y Al-Mg) presentan mejores propiedades como resistencia y ductilidad; son utilizadas generalmente en geometrías más complejas y como matriz en materiales compuestos de matriz metálicas.

Las aleaciones más importantes obtenidas vía colada o conformado mecánico se muestran en la tabla 2.3<sup>20,21</sup>.

Tabla 2.3 Aleaciones importantes utilizadas en la fabricación de materiales compuestos base aluminio<sup>21</sup>.

Aleaciones	Composición	Procesamiento
201	Al-4.6Cu-0.35Mg-0.35Mn-0.2 Ti	Método del vórtice
213	Al-7.0Cu-2Si-2.5Zn-0.6Mn-0.1Mg	Método del vórtice
355	Al-5Si-0.5Mg-0.5Mn-1.2Cu-0.35Zn-0.25Ti	Método del vórtice
356	Al-7.0Si-0.25Cu-0.3Mg-0.35Mn-0.35Zn-0.25Ti-0.6Fe	Método del vórtice
360	Al-9.5Si-0.6Fe-0.35Mn-0.15Mg-0.5Ni-0.5Zn	Método del vórtice
413	Al-12Si-2Fe-1Cu-0.5Ni-0.5Zn-0.35Mn	Método del vórtice
518	Al-8Mg-1.8Fe-0.35Mn-0.25Cu	Método del vórtice
2014	Al-4.4Cu-0.5Mg-0.9Si-0.4 Mn	Metalurgia de polvos
2024	Al-4.35Cu-1.5Mg-0.65Mn-0.5Si	Metalurgia de polvos
6061	Al-0.25Cu-1.0Mg-0.6Si	Metalurgia de polvos, Método del vórtice
6063	Al-0.64Si-0.23Fe-0.22Cu-0.0012Mn-0.001Ni	Metalurgia de polvos

### 2.1.2 Procesamiento

Una forma adicional de clasificación de los compuestos de matriz metálica está dada por la técnica de procesamiento empleada; con base en esta, se tendrá una influencia sobre los siguientes parámetros<sup>8,18,19,22</sup>:

- a) Variación e interacción entre el refuerzo y la matriz.
- b) Microestructura deseada.
- c) Propiedades finales.

Las rutas para la producción de materiales compuestos son tres:

1. Procesos en fase líquida, semilíquida o pastosa.
2. Procesos en fase sólida.
3. Procesos de dos fases (sólido/líquido).

En la figura 2.4 se muestran los procesos de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica empleados en los últimos 10 años y el porcentaje de cada uno. Se puede apreciar que la metalurgia de polvos se ha posicionado

como uno de los métodos más estudiados y empleados debido a los altos beneficios que trae en la producción de los MMC's<sup>18,19,22</sup>.

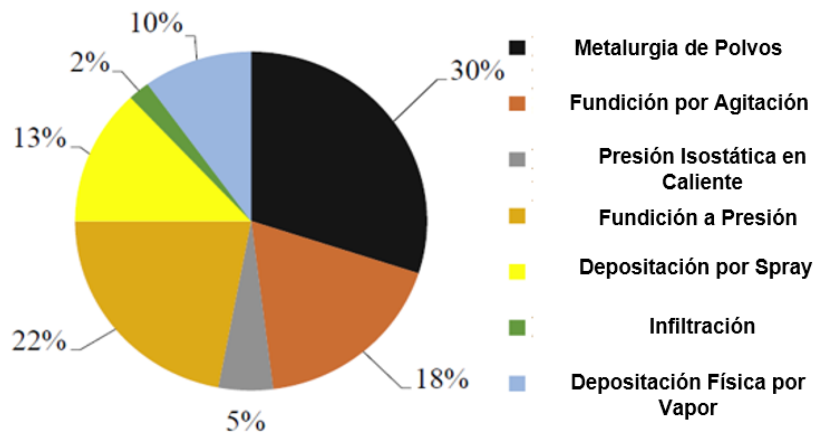


Figura 2.4 Procesos de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica empleados en los últimos 10 años<sup>7</sup>.

La figura 2.5 muestra una clasificación más detallada de los procesos de fabricación más comunes. Como se detallará posteriormente, cada uno de estos procesos presenta ventajas y limitaciones relacionadas con los costos de producción, la complejidad de obtención de piezas, acabado, calidad y huella ambiental<sup>16,19,23</sup>.

M.K. Surappa<sup>16</sup> comparó y clasificó los distintos procesos con base en ciertas características tales como limitaciones de forma, nivel de producción, nivel de refuerzo, degradación y costo; estos datos se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Clasificación de los métodos de producción de materiales compuestos en función de sus principales características<sup>16</sup>

Método	Rango de forma y tamaño	Producción	% vol. del refuerzo (%v)	Daños al refuerzo debidos al método	Costo
Metalurgia Líquida	Amplio rango de formas y tamaños relativamente grande hasta 500 kg aprox.	Muy alta (<90%)	Hasta 30%vol	Sin daños	Bajo
Fundición a Presión	Preformas limitadas, piezas con tamaño de 20 cm.	Baja	Hasta 45 %vol	Daños severos	Muy bajo
Metalurgia de polvos	Amplio rango, tamaño restringido.	alto	Hasta 40%vol	Fractura del refuerzo	Alto

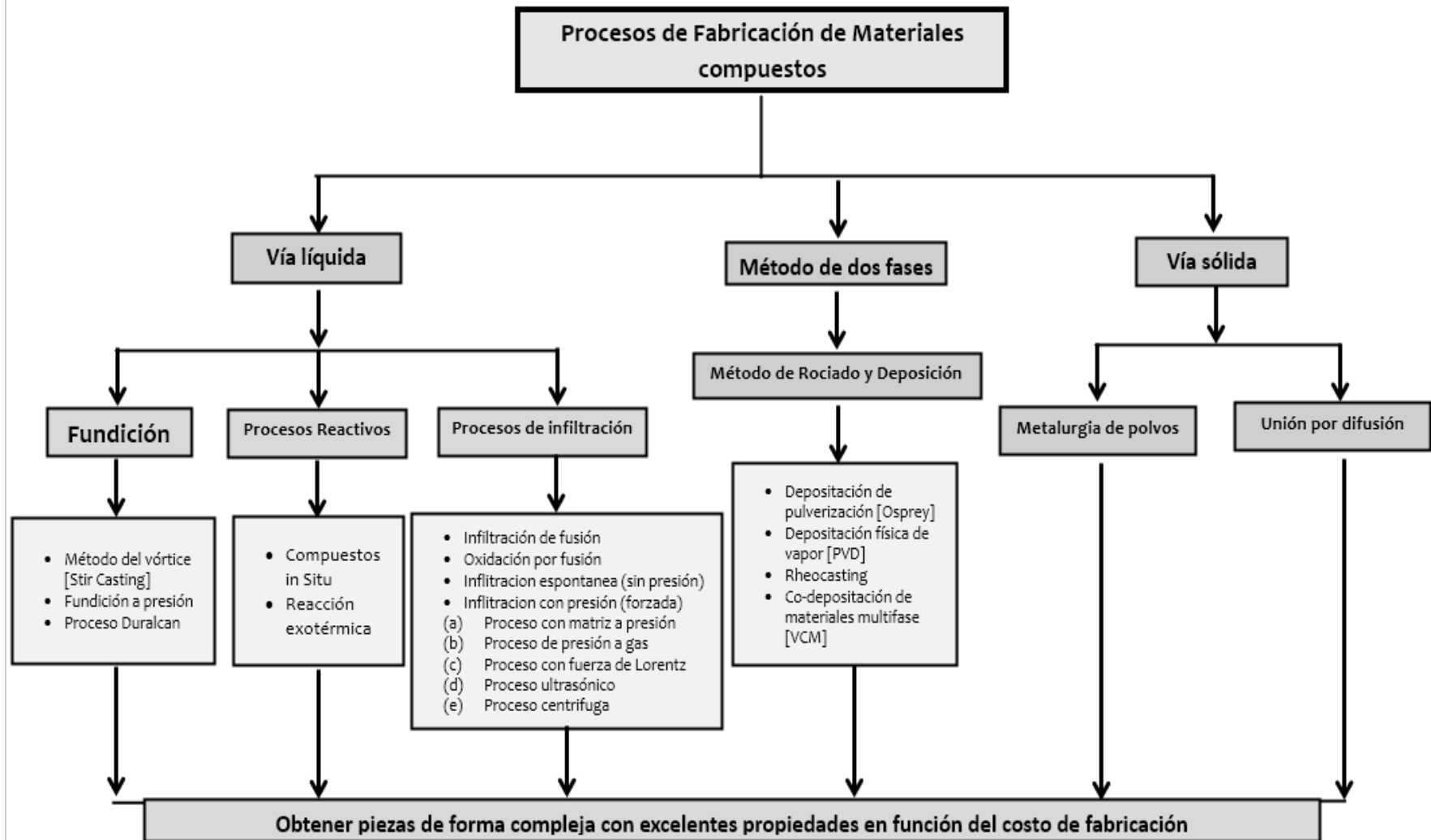


Figura 2.5. Diagrama de los procesos para la fabricación de materiales compuestos base aluminio.

## 2.2 Proceso de Fase Líquida.

El proceso más utilizado en la industria para la fabricación de materiales compuestos de matriz metálica por la vía líquida o fundición es el método del vórtice o también llamado fundición por agitación, figura 2.6. Este proceso consiste en la introducción de un refuerzo cerámico al baño metálico lo cual puede realizarse por distintos métodos:

- Inyección de polvos con gas inerte (Ar o N<sub>2</sub>)
- Adición de refuerzo cerámico en un molde sobre el baño líquido
- Adición del refuerzo cerámico en el metal fundido con formación del vórtice por agitación mecánica

Adición de pequeños bloques compactados con refuerzo cerámico en la masa fundida sobre la agitación.

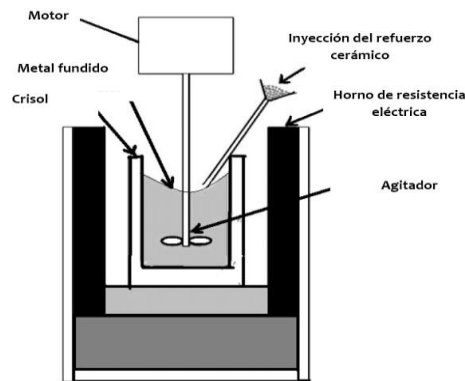


Figura 2.6. Diagrama del equipo utilizado por el proceso de fundición por agitación<sup>24</sup>.

La técnica más utilizada es la inyección del refuerzo con gas inerte en especial con argón debido a la formación de defectos y la alta solubilidad del hidrógeno en el baño metálico de aleación base aluminio. La agitación generalmente se lleva a cabo por medio mecánico para poder contrarlar la velocidad de agitación. De igual manera, es importante la geometría de la paleta para el control del vórtice para que este no sea excesivo y que con ello se pierda la unión matriz/refuerzo. La temperatura generalmente empleada en matrices base aluminio es 800°C y el uso de tratamiento térmico al refuerzo cerámico es algo convencional<sup>25,26</sup>.

El método del vórtice es relativamente barato, pero a veces complejo por la gran cantidad de parámetros a controlar (tiempo de agitación, ángulo de paletas, velocidad de agitación, etc.)<sup>25,26</sup>.

Al controlar los anteriores parámetros y llevar a cabo la formación del vórtice, este rompe una capa de óxido formado en la superficie del baño metálico lo que

permite la incorporación del refuerzo cerámico al metal líquido provocando una pérdida de fluidez. El control del tiempo de agitación, ángulo de paletas y la velocidad de agitación aunado a una buena humectación del refuerzo cerámico, evita la degradación, la segregación o el rechazo del refuerzo cerámico en el baño metálico<sup>25,26</sup>.

La metalurgia por la vía líquida sobresale en la parte económica por la viabilidad de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica pero su fabricación tiene problemáticas que afectan las propiedades mecánicas y que se engloban en la tabla 2.5<sup>8,18,19</sup>.

Tabla 2.5. Problemáticas del método de fabricación de MMC's por fundición por agitación<sup>8,18,19</sup>.

<b>Problemática</b>	<b>¿Porque sucede?</b>	<b>Solución</b>
Rechazo de las partículas del baño metálico	Mala humectación	Agregar agentes humectantes o tratamiento térmico al refuerzo metálico.
Humectación	No existe una reacción química en la interfase matriz/refuerzo.	Agregar agentes humectantes, tiempos de permanencia cortos, tratamiento térmico del refuerzo cerámico y controlar la temperatura del metal líquido.
Distribución heterogénea del refuerzo cerámico	Diferencia de densidades entre el refuerzo y el baño metálico se genera asentamiento o flotación de partículas.	Tiempo de permanencia del metal líquido, tamaño de partículas inadecuado, velocidad de agitación y tiempo de agitación inadecuadas.
Reacciones interfaciales	Reacciones químicas provocadas por la interacción entre el refuerzo con los agentes humectantes o contaminantes en el baño metálico	Limpieza del baño metálico libre de impurezas con gas inerte y que herramientas estén cubiertos con material refractario y que sean resistentes altas temperaturas.
Velocidades de enfriamiento	La velocidad de enfriamiento depende del molde utilizado debido a que las velocidades de solidificación son rápidas en molde metálico y lentas en molde de arena dando asentamiento o una distribución heterogénea.	Tiempos de permanencia cortos y tiempos de colada rápidos permitirá que aleaciones no ferrosas solidifiquen rápido y tengan defectos además de calentar los moldes para evitar choques de temperatura y posibles defectos.

La capacidad que presenta el metal líquido para extenderse sobre el refuerzo cerámico y representa el grado de contacto entre la interfase sólido/líquido es conocida como humectabilidad que es reducida por la segregación y formación de películas de oxido en la superficie del refuerzo<sup>25,26</sup>.

Se ha identificado a ciertos elementos que promueven la humectabilidad en sistemas base aluminio; como magnesio, cerio, titanio, bismuto, cobre, zinc y tierras raras como zirconio, y lantano son algunos de estos<sup>27,28,29</sup>.

Al adicionar elementos al baño metálico se promueve la humectabilidad al disminuir la energía interfacial sólido/líquido y evitando reacciones en la interfase. El efecto obtenido al incorporar las partículas reforzantes al metal fundido es una distribución homogénea y una unión matriz/refuerzo<sup>29</sup>

Las partículas son el tipo de refuerzo más empleado en la fabricación de materiales compuestos tanto por vía líquida como sólida debido a su relativo bajo costo, éstas interactúan de forma distinta con la matriz dependiendo del tamaño que presentan. Se han determinado estas condiciones y son mostradas en la tabla 2.6<sup>12,20</sup>.

Tabla 2.6. Ventajas y desventajas del tamaño de las partículas empleadas en la fabricación de MMC's<sup>20</sup>.

<b>Tamaño relativo</b>	<b>Tamaño de partícula [<math>\mu m</math>]</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Fino	<10	Mayor resistencia y rigidez. Mayor resistencia a la fatiga. Bajo coeficiente de expansión térmica.	Tendencia a formar aglomerados. Dificultad de ser incorporados en la fundición. Baja ductilidad.
Mediana	10-100	Excelente equilibrio para propiedades mecánicas como (buena resistencia y excelente ductilidad), mayor facilidad de fabricación.	Utilizado para alto porcentaje de refuerzo Equilibrio entre propiedades y costos de fabricación.
Gruesa	100-1000	Buena resistencia al desgaste. Alta ductilidad y facilidad de fabricación. Ideal para aplicaciones como armamento.	Presencia de segregación durante la fundición Menor beneficio para propiedades resultantes.



La clasificación de las partículas se da en función del tamaño; partículas finas bien dispersas transfieren a la matriz una carga aplicada por lo que ésta soporta esa carga como un “colchón” con muy poca o nula transferencia a la fase dispersa. Dando como resultado un mejor incremento en propiedades mecánicas tales como resistencia a cedencia, esfuerzo de tensión y dureza producto de las interacciones partícula-dislocación que restringen el flujo plástico en las aleaciones base aluminio<sup>20</sup>.

Las partículas en un intervalo de 10 µm a 100 µm existe un efecto gravitacional que no es despreciable y, se desarrollará un gradiente de partículas con propiedades buenas, pero con la problemática que exista segregación y/o aglomeración. Con partículas de tamaño superior a 100 µm, las interacciones partículas-matriz son mínimas debido a que son más difíciles de llevar a cabo. Al aplicar una carga al material, la matriz transfiere solo una fracción de ésta a las partículas las cuales presentan una pobre interacción partícula-matriz debido a la falta de adherencia<sup>20</sup>.

### **2.3 Proceso de Fase Líquida.**

La denominada metalurgia de polvos es un método de producción que compite con el método del vórtice en cuestión de costos y complejidad de piezas a fabricar. Los MMC's producidos a partir de polvos metálicos mezclados con partículas cerámicas son compactados y sinterizados para alcanzar una consolidación final<sup>8,18</sup>.

Por medio de este método se puede emplear porcentajes mayores de refuerzo, menores temperaturas de trabajo,  $\left(\frac{2}{3}T_{fusion}\right)$ , mayor control en la porosidad, menores pérdidas de material y una reducción de procesos terciarios lo que se refleja en mejores propiedades mecánicas y un menor costo de fabricación. Esta técnica ha sido diseñada y aplicada por la metalurgia tradicional en aleaciones monolíticas en la fabricación de piezas complejas. Su adaptación para la fabricación de componentes de materiales compuestos involucra los siguientes pasos:<sup>8,18,19</sup>.

- Producción o selección de polvos
- Caracterización de polvos
- Mezclado de polvos
- Compactación
- Sinterización
- Ensayos mecánicos y/o tribológicos

### 2.3.1 Métodos de Producción de Polvos.

Los polvos de aleaciones metálicas varían en tamaño, morfología, distribución, porosidad, etc., en función de la ruta de producción. Cabe mencionar que ninguna de las rutas de producción mencionadas a continuación presenta un rendimiento del 100%<sup>30,31</sup>.

- a) **Método Químico:** Las partículas se obtienen al producir reacciones químicas que dependen de aspectos cinéticos y termodinámicos. Los métodos más importantes son depósitos electrolíticos, descomposición térmica, precipitación de un gas, síntesis reactiva sólido-sólido.
- b) **Método Físicoquímico:** Consiste en reacciones fisicoquímicas (electrólisis, pirólisis, condensación) mediante las cuales se logra la obtención de polvos de cobre, hierro, níquel, vanadio, etc. Mediante este método se producen polvos de alta pureza.
- c) **Método mecánico:** Es el método más barato de producción de polvos que implica suministrar distintas fuerzas de compresión, corte o impacto para reducir el tamaño de partícula. Los más utilizados son atomización, molienda y trituración.

### 2.3.2 Atomización.

Es el método más utilizado para producir polvos metálicos no ferrosos en especial aleaciones base aluminio. La atomización consiste en romper un fluido a altas presiones para romper un flujo de metal líquido en gotas muy finas que solidifican rápidamente. La producción industrial de polvos mediante esta vía está asociada a dos procesos de atomización generales: por aire y por gas inerte. Algunos otros métodos involucran el uso de agua, gas soluble o al vacío<sup>30,31</sup>.

### 2.3.3 Atomización por Gas (Inerte o Aire).

El proceso de atomización por gas es similar a la atomización por agua, teniendo como única diferencia el uso de gas durante el proceso. El equipo utiliza un horno que contiene un cámara de atomización de modo que la corriente del metal fundido ingresa a esta. Se ha encontrado que la producción de polvos relacionada con la posición de la cámara de atomización e influye en la velocidad de producción y tamaño del polvo. La tasa de producción es más lenta si la cámara de atomización esta verticalmente, como se muestra en la figura 2.7<sup>30,31</sup>.

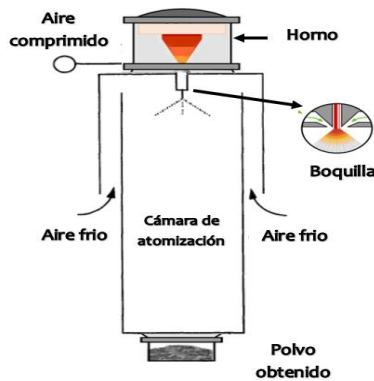


Figura 2.7. Esquema del proceso de utilización de aire para la producción de polvos de aluminio<sup>31</sup>.

Antes de la atomización, la cámara se purga con un gas de composición similar al del gas de atomización a fin de minimizar gases indeseables como vapor de agua. El gas o aire de atomización incide sobre el metal líquido a una alta presión provocando su dispersión en forma de partículas; inmediatamente después en la cámara de atomización, se inyecta aire frío con lo que se logra disminuir la temperatura y la oxidación de las partículas. Posteriormente, las gotas solidifican dando como resultado partículas semiesféricas con morfología celular o dendrítica cuyos tamaños dependen de factores como el diámetro de boquilla atomizadora, viscosidad, temperatura, atmosfera (aire o gas inerte), velocidad de atomización, presión de gas, flujo másico, tiempo de solidificación, transferencia de calor, medio de enfriamiento<sup>30,31</sup>.

### 2.3.4 Caracterización de Polvos.

La importancia de la metalurgia de polvos depende de la caracterización de los polvos obtenidos por los medios ya sean físicos, químicos o mecánicos. El método de producción depende en gran medida de la morfología de la partícula, distribución, pureza, porosidad, densidad en verde, densidad relativa y velocidad de derrame. Todos estos parámetros influyen en el comportamiento del polvo en los procesos posteriores como compactación y sinterización<sup>32,33,34</sup>.

#### 2.3.4.1 Morfología de Partícula.

La forma y tamaño de las partículas depende del método de producción. Las partículas se pueden dividir en esféricas, dendríticas e irregulares como se muestra en la figura 2.8. Distintas morfologías pueden encontrarse en una muestra por lo que es necesario realizar una caracterización que cuantifique la distribución dependiendo del método de obtención ya que no siempre existe un buen control del tamaño y forma de partícula<sup>34</sup>.










Morfología	Proceso de obtención	Morfología	Proceso de obtención
 Acicular (una dimensión)	Descomposición química	 Acicular irregular	Descomposición química y Molienda
 Dendrítica (dos dimensiones)	Electrolítica	 Hojuela	Molienda
 Esférica (tres dimensiones)	Atomización carbonílica (Fe) Precipitación líquida	 Redondeada	Atomización y Descomposición química
 Irregular	Atomización y Descomposición química	 Porosa	Reducción de óxidos
 Angular	Desintegración Carbonílica mecánica (Ni)		

Figura 2.8. Morfología de las partículas dependiendo su método de producción<sup>34</sup>.

### 2.3.4.2 Densidad Aparente y Densidad Real.

La densidad aparente se define según la norma ASTM B-212 como la cantidad de masa de polvo por unidad de volumen, este parámetro influye el comportamiento del polvo durante la compactación y sinterización, y está en función del tamaño, tipo y porosidad de la partícula<sup>34,35</sup>.

Para determinar la densidad aparente se emplea un equipo denominado flujómetro de Hall que es un recipiente de latón con un volumen de 25 cm<sup>3</sup> (ASTM B-212) el cual es llenado con el polvo que pasa por el embudo medidor de flujo, como se muestra en la figura 2.9. Las partículas fluyen debido al golpeteo mecánico pero el tamaño, forma y superficie rugosa que existe en las partículas genera cierta fricción entre estas. Como consecuencia la densidad aumentará debido al golpeteo mecánico dando como resultado que la densidad real sea mayor a la densidad aparente<sup>33,34,35</sup>

La densidad real se determina a partir del peso específico de las partículas de polvo ocupado en un volumen sin considerar la porosidad de las partículas<sup>33,34</sup>.

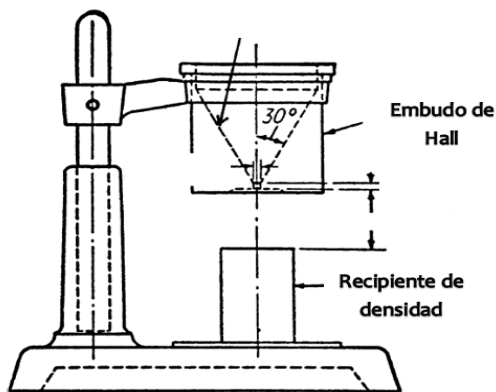


Figura 2.9. Equipo de Hall utilizado para determinar la densidad aparente<sup>35</sup>.

### 2.3.4.3 Velocidad de Flujo.

Se determina como la cantidad de polvo que fluye a través de un embudo por cierto tiempo y tiene como función, la velocidad de llenado en la matriz para prensado empleando equipos como los medidores de Carney y Hall. En ambos equipos según la norma ASTM B- 212, se pesan 50 gramos de polvos y se dejan caer por el embudo. La cohesión y la diferencia entre tamaño de partículas son las causantes de disminuir o detener el flujo de estas <sup>35</sup>.

### 2.3.5 Mezclado de Polvos.

El mezclado de polvos es el proceso previo a la compactación y sinterización; el objetivo es homogenizar polvos de diferente tamaño para reducir porosidad y obtener una distribución uniforme de partículas. La mezcla obtenida se puede clasificar (figura 2.10) como una (a) mezcla homogénea o uniforme, (b) aglomerada, (c) distribuida o aleatoria y (d) segregada<sup>32,34</sup>.

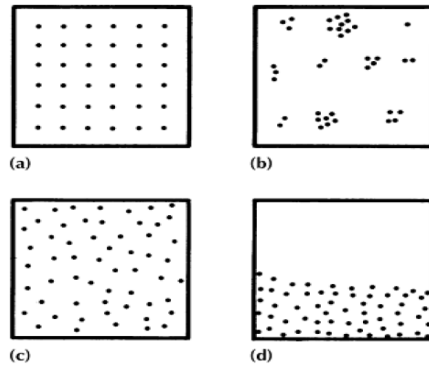


Figura 2.10. Distribución de las partículas debido al proceso de mezclado<sup>34</sup>.

El mezclado se logra vía húmeda o seca siendo esta última la más empleada; el mezclado puede ser del tipo convectivo (transferencia de las partículas de un lado a otro), difusivo (movimiento de partículas sobre la superficie formada) y por corte<sup>31</sup>.

### 2.3.6 Compactación.

La compactación es un método de consolidación en el que al aplicar una fuerza se logra dar forma y consistencia a la masa de polvo para resistir la sinterización<sup>34,36</sup>.

El método de compactación debe aportar suficiente resistencia para soportar la expulsión de la matriz y su posterior sinterización como se observa en la figura 2.11.

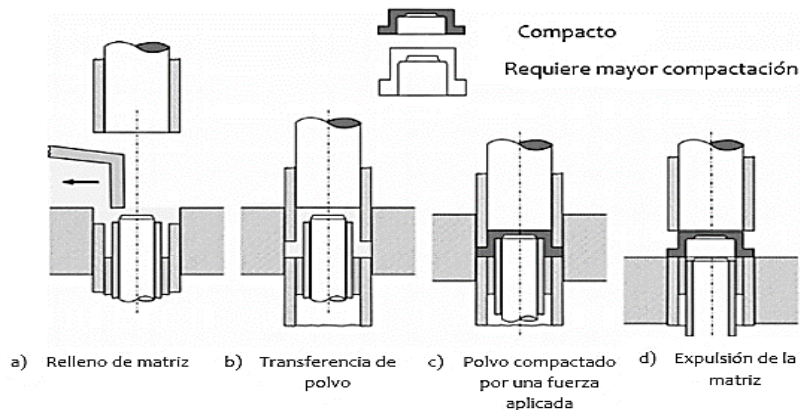


Figura 2.11. Secuencia de la compactación de los polvos mediante sus cuatro fases<sup>36</sup>.

### 2.3.6.1 Compactación con Presión.

La matriz en frío o compactado en frío, es la técnica más utilizada y económica para la producción de piezas. Consiste en aplicar una presión externa para compactar el polvo colocado dentro de la matriz fría en una dirección, dos direcciones o en matriz flotante. En todos los casos es necesario la utilización de una prensa hidráulica o troquel para la compactación<sup>34,36,37</sup>.

#### 2.3.6.1.1 Presión aplicada en una dirección y dos direcciones.

La matriz es llenada con el polvo, posteriormente se le aplica la carga usando un punzón de manera axial (una dirección) o dos punzones (dos direcciones) haciendo presión por la parte inferior y superior para llevar a cabo la compactación como se observa en la figura 2.12. En ambos casos la problemática radica en la homogeneidad debido a que, en una dirección la masa del polvo se pierde y en dos direcciones, no exista la misma presión<sup>38</sup>.

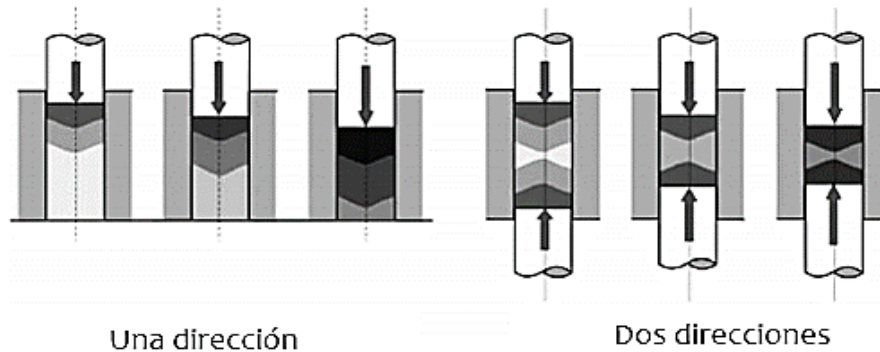


Figura 2.12. Compactación en una dirección y dos direcciones<sup>36</sup>.

### 2.3.6.2 Comportamiento del Polvo en la Compactación.

En la compactación en frío existen varias etapas que permiten obtener un producto libre de defectos para su posterior sinterización. Las partículas que son sometidas a presión dentro de la matriz, interactúan entre sí hasta ocupar el volumen

disponible logrando una alta compatibilidad en la pieza deseada a la presión máxima<sup>32,33,34</sup>.

La primera etapa consiste en empaquetar y ordenar el movimiento de las partículas conforme aumenta la presión. Al aplicar la carga, estas sufren deformación durante su compactación y pasan de una deformación elástica a plástica por lo que aumenta su resistencia y densidad <sup>32,33,34,36</sup>.

### **2.3.6.3 Lubricación.**

La lubricación juega un papel importante en el proceso de compactación debido a que, en ausencia de lubricación, la fricción se hace presente entre las mismas partículas o por la interacción de las partículas con la matriz y el punzón. Si no existe una buena lubricación, el polvo podría no compactarse y/o dificultar la expulsión de la pieza de la prensa hidráulica debido al exceso desgaste.

Los lubricantes pueden ser aplicados a la matriz o al polvo, dependiendo del sistema de mezclado. Si la lubricación se realizará sobre el polvo metálico, se debe tomar en cuenta la composición y estructura del lubricante<sup>34</sup>.

El lubricante ideal debe evaporarse o descomponerse, no debe ser tóxico y no debe generar reacciones o interacciones con el polvo metálico que puedan dañar el horno de sinterización. Se debe evitar además la segregación, desgaste y formación de defectos superficiales en las piezas<sup>34</sup>.

### **2.4 Sinterización.**

Es el proceso de densificación de los polvos después del compactado. La sinterización requiere de temperaturas elevadas para unir y aumentar la resistencia en verde de las partículas adyacentes mediante mecanismos de transporte de masa por debajo de la temperatura de fusión. El mecanismo de sinterización de polvos se simplifica en 5 etapas del proceso, como se observa en la figura 2.13<sup>32,33,34</sup>.

La unión entre partículas comienza cuando se logra cierto grado de movilidad atómica, posteriormente se forman pequeños cuellos en los puntos de contactos con las partículas que continúan en crecimiento con la formación de poros, con una densificación pequeña y una contracción de 5%<sup>32,33,34</sup>.

El crecimiento de cuellos ayuda a disminuir la porosidad en un 5-10% cubriendo la mayor parte de la densificación. A medida que el cuello sigue creciendo, la curvatura disminuye haciendo que el poro se vuelva esférico y de tamaño menor. A medida que la sinterización avanza se produce el cierre del canal de poros en vacíos y aislados<sup>32,33,34</sup>.

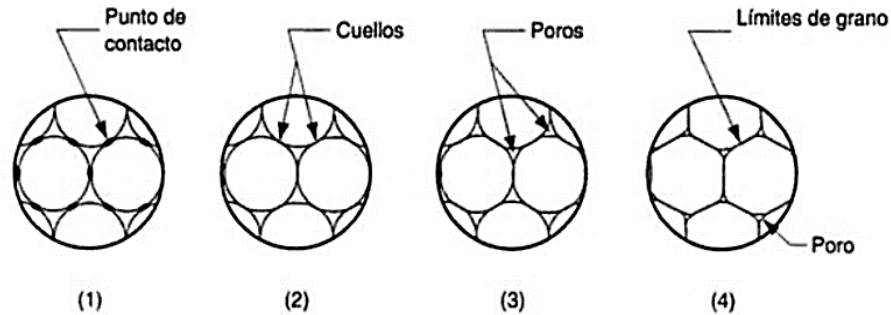


Figura 2.13 Esquema representativo de las fases del proceso de sinterización, (1) unión de partículas y formación de puntos de contactos, (2) crecimiento de cuellos, (3) reducción del tamaño de poro y (4) crecimiento de límite de grano<sup>34</sup>.

### 2.4.1 Mecanismos de Sinterización.

Los mecanismos de sinterización dependen de distintos parámetros como la temperatura, tiempo, atmósfera y velocidad de enfriamiento.

1. Temperatura: Mecanismo principal en el proceso de sinterización; para que se lleve a cabo la temperatura debe ser hasta  $2/3$  la temperatura de fusión. Algunos investigadores recomiendan incrementar  $10^{\circ}\text{C}$  para duplicar la velocidad de sinterización<sup>34</sup>.
2. Tiempo de sinterización: Está relacionado con la temperatura de sinterización y con la difusión del proceso. Un mayor tiempo genera un mayor crecimiento de grano, menor temperatura y viceversa como se muestra en la figura 2.14, de acuerdo con ASTM<sup>34</sup>.

Es común el empleo de atmósferas a fin de proteger y producir una capa de óxido en la superficie y mejorar la unión entre partículas. Una atmósfera evita reacciones indeseables, activa la sinterización y ayuda a que no se formen elementos indeseables que afecten las propiedades de la pieza obtenida. Las atmósferas más importantes son argón (Ar), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), vacío y  $\text{NH}_3$ <sup>34</sup>.

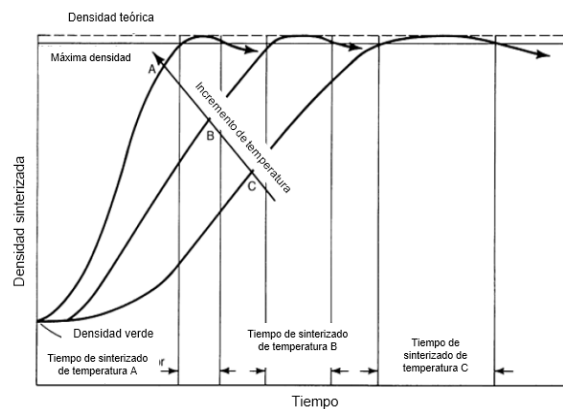


Figura 2.14 Gráfica representativa entre el tiempo, temperatura de sinterización y la densidad<sup>34</sup>.



La unión entre las partículas de polvo requiere del transporte de materia desde el interior hasta las áreas donde están en contacto entre sí; los mecanismos de transporte involucrados se resumen en la tabla 2.7 <sup>32,33,34</sup>.

Tabla 2.7. Mecanismos de sinterización<sup>34</sup>.

<b>Mecanismo</b>	<b>Fuente de energía</b>	<b>Densificación/No</b>
Difusión superficial	Superficial	NO
Difusión de red	Superficial	NO
Transporte vapor	Superficial	NO
Frontera de grano	Frontera de grano	Densificación
Difusión de red	Frontera de grano	Densificación
Difusión de red	Dislocaciones	Densificación

Transporte de vapor (evaporación/ condensación), difusión de red (volumen), difusión superficial, difusión de límite de grano y movimiento de dislocaciones son ejemplificados en la figura 2.15 y se detallan a continuación:

- a) Difusión superficial. Consiste en el movimiento de los átomos a través de la superficie, los puntos de contacto generan un crecimiento de los cuellos y de las partículas sin densificación. Al aumentar la temperatura, el mecanismo de evaporación y condensación de equilibrio (donde el transporte de masa ocurre debido al gradiente sobre la superficie del cuello), es menor que la superficie de la partícula<sup>37,38,39</sup>.
- b) Difusión del límite de grano. Considerado el principal mecanismo que considera los esfuerzos presentes en las partículas debidos a la compactación. Este presenta un efecto sobre las dislocaciones y átomos que se mueven simultáneamente por la difusividad a través de los límites de grano. La difusión desde el límite de grano a los poros permite el crecimiento del cuello<sup>37,38,39</sup>.
- c) Difusión de red. El transporte de material por difusión de red, consiste en el movimiento de átomos o vacancias a lo largo de los límites de grano. La energía que impulsa la sinterización es la energía de superficie libre de partículas y puntos de contacto entre partículas adyacentes <sup>33,34,39</sup>.
- d) Flujo plástico. El mecanismo de flujo plástico entra por el movimiento de las dislocaciones que pueden causar el crecimiento del cuello y el arrastre de las partículas debido a la sinterización a través de la densificación o deformación de las partículas<sup>37,38,39</sup>.

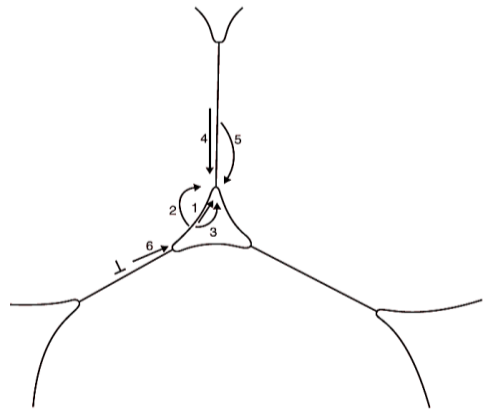


Figura 2.15 Representación esquemática de los mecanismos de sinterización en un sistema de 3 partículas, 1) Difusión de superficie, 2) Difusión de red (desde la superficie), 3) Transporte de vapor, 4) Difusión de límite de grano, 5) Difusión de red (límite de grano) y 6) Flujo plástico<sup>39</sup>.

## 2.5 Técnicas de Caracterización Microscópica.

Las técnicas por microscopía óptica o de barrido se ha utilizado como una herramienta para estudiar y caracterizar la mayoría de los materiales. La microscopía depende del equipo y la fuente de imagen: el microscopio óptico o de luz (MO) y el microscopio electrónico (ME). Ambas técnicas tienen el mismo principio de funcionamiento, la diferencia es que la microscopía óptica utiliza la luz como fuente mientras que la microscopía electrónica utiliza un haz de electrones acelerados. El uso de estas técnicas sobre los materiales compuestos de matriz metálica comprende una gran importancia para la interpretación<sup>40,41,42,43,44</sup>.

### 2.5.1 Microscopía Óptica.

La microscopía óptica, debido a su simplicidad ha sido de gran interés en la caracterización de materiales, aunque su resolución se limita a bajos aumentos (por debajo de 1000x). Generalmente se utilizan colorantes, reveladores y soluciones químicas para la revelación de la microestructura<sup>42,44</sup>.

En el mecanismo de la microscopía óptica se utiliza una fracción de luz visible que incide sobre la superficie y, es transmitida o reflejada por un sistema de lentes para ampliar las imágenes de las muestras pequeñas como se muestra en la figura 2.16. Al variar los lentes y la fuente de luz, se pueden definir cinco tipos de microscopía: campo claro, campo oscuro, contraste de fase, interferencia diferencial y fluorescencia<sup>42,44</sup>.

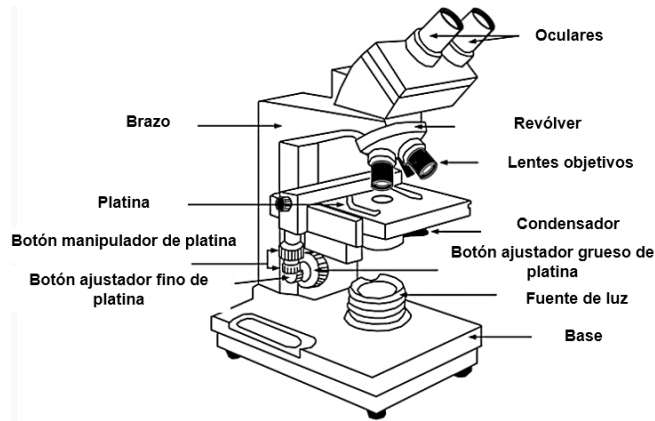


Figura 2.16 Esquema interno del microscopio óptico<sup>45</sup>.

El microscopio óptico nos puede entregar resultados como segregación, inclusiones, defectos superficiales, dendritas, límite de grano, intermetálicos, partículas o clústeres. Entre mayor sea la resolución, habrá mayor definición<sup>40,43</sup>.

### 2.5.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

La microscopía electrónica de barrido permite obtener datos de alta resolución ya que, en lugar de utilizar luz visible, un haz de electrones acelerados enfoca la superficie del material creando la imagen con una alta resolución <sup>42,43,44</sup>.

Para formar la imagen de una muestra esta se bombardea con un haz de electrones en un cátodo de filamento mediante una pistola de electrones los que se aceleran desde 1kV hasta 50kV; el condensador y lentes objetivos son enfocados como se observa en la figura 2.17<sup>42,43,44</sup>.

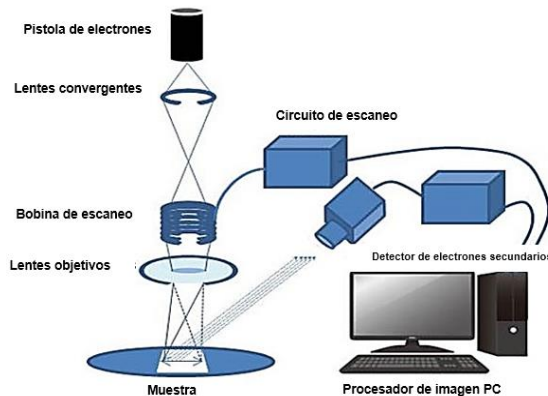


Figura 2.17. Esquema interno del microscopio electrónico de barrido<sup>45</sup>.

Al impactar los electrones sobre la muestra ocurren interacciones entre los electrones y la muestra produciendo radiaciones secundarias como: electrones

secundarios de baja energía (menor a 50 eV); electrones retro dispersados (50 eV) y electrones incidentes (su intensidad varía con respecto al ángulo que forma el haz incidente con la superficie) <sup>41,43,44</sup>.

La señal de los electrones secundarios de baja energía y de los retro dispersados son recogidos por un detector y posteriormente, amplificados. El contraste de la imagen depende de la superficie y de si las áreas proyectadas son oscuras.

La microscopía electrónica de barrido se encarga de determinar con mayor precisión el tamaño de partícula, distribución de poros, mapeo general de la muestra, morfología, inclusiones y segundas fases<sup>41</sup>.

Las ventajas del microscopio electrónico sobre la microscopía óptica son enormes, principalmente por la direccionalidad y profundidad de enfoque. Algunas diferencias se enlistan a continuación<sup>41</sup>:

- a) Son idénticos en la funcionalidad, la diferencia radica en la calidad de imagen.
- b) El haz empleado es diferente, la microscopía electrónica usa un haz de electrones en lugar de luz visible, utilizada en la microscopía óptica.
- c) Resolución del microscopio óptico es de (10x hasta 2000x) y el microscopio electrónico (90-800,000x).

## **2.6 Métodos de Cuantificación de Partículas.**

Existen varios métodos de cuantificación que permiten determinar la distribución y la dispersión de las partículas en la matriz. La cuantificación se basa en los métodos desarrollados por microscopía óptica o electrónica para la caracterización y descripción de las fases en la matriz. Los distintos métodos permiten cuantificar el grado de distribución, dispersión en cierta región o distancia y permiten comprender y controlar variables del proceso para obtener excelentes propiedades. La cuantificación ha sido estudiada por varios investigadores para determinar si los materiales compuestos presentan una distribución homogénea o existe aglomeración; además, permiten determinar el tamaño y distancia entre partículas <sup>42,43</sup>.

Los métodos utilizados para la cuantificación de partículas se basan en parámetros microestructurales y están relacionados con ecuaciones matemáticas, modelos de estadísticos y de variabilidad como la desviación estándar, varianza y coeficiente de variación. Los métodos más utilizados para cuantificar la homogeneidad y el grado de distribución de partículas en materiales compuestos de matriz metálica mediante análisis estadístico se mencionan a continuación <sup>42,43,46</sup>.

### 2.6.1 Método del Cuadrante.

Técnica más utilizada para caracterizar la dispersión de partículas pequeñas. En este método, el área que se mide se divide en pequeñas celdas de igual tamaño, llamadas cuadrantes y se cuenta el número de partículas en cada cuadrante. Dado que considera los números y la disposición espacial en la muestra, el método del cuadrante puede estimar los efectos de la dispersión y de distribución en combinación. En general, para un compuesto con partículas con distribución y dispersión uniforme, se esperaría que la mayoría de los cuadrantes tengan aproximadamente el mismo número de partículas. En contraste, para un compuesto con aglomerados de partículas, se esperaría que algunos cuadrantes estén vacíos, algunos tengan algunas partículas y otros tengan muchas partículas. La medición de partículas por cada cuadrante es la suma y se puede calcular a partir de la ecuación (1):

$$\beta = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^3 \quad (1)$$

donde  $(x_i)$  es el número de partículas,  $(i)$  es el cuadrante,  $(\bar{x})$  es la media de  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ),  $(\sigma)$  es la desviación estándar de  $(x_i)$ .

Sin embargo, se puede medir el índice de oblicuidad ( $\beta$ ), como el grado de asimetría estadística en la distribución en función de la media del número de partículas, desviación estándar de las partículas. Altos valores de  $\beta$  indican una distribución deficiente por lo que las partículas están distribuidas en algunos cuadrantes<sup>46,47</sup>.

### 2.6.2 Método del Camino Libre.

Método propuesto por Luo y Kuo<sup>46</sup>, el cual cuantifica la dispersión de partículas en espacios libres que están divididos en un plano con múltiples lianas en forma de cuadrícula. Una distribución logarítmica, se puede calcular un parámetro de dispersión o probabilidad de distribución de partículas considerando el porcentaje de distribución y el tamaño de aglomeración<sup>46</sup>.

### 2.6.3 Método de la Distancia entre el Vecino más Cercano.

Método propuesto por Clark y Evans<sup>46</sup>, el cual midió la distancia de cada partícula o centro de gravedad de cada partícula vecina cercana y mediante estadística correlacionó la distancia media total para la medición cuantitativa de la distribución<sup>46</sup>.

### 2.6.4 Método de Análisis de Homogeneidad.

El método de análisis de homogeneidad es empleado en la cuantificación de las partículas en los materiales compuestos a partir de su distribución o la homogeneidad. Se basa en los espacios libres o distancias que existe entre dos partículas vecinas se trazan líneas rectas horizontales y verticales como se observa en la figura 2.18<sup>46</sup>.

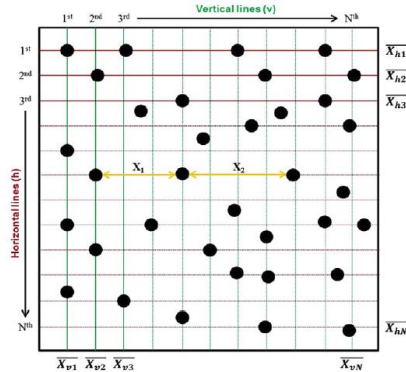


Figura 2.18 Ilustración esquemática del método de análisis para cuantificación de distribución en el material compuesto<sup>46</sup>.

Los espacios libres que existen entre cada partícula vecina se registran como datos en función de la distancia ( $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ ) para obtener la media aritmética de cada espacio libre en cada línea (N) y se calcula con la ecuación (2).

$$\bar{X} = \left( \frac{(\bar{X}_{h1} + \bar{X}_{h2} + \dots + \bar{X}_{hN}) + (X_{v1} + \bar{X}_{v2} + \bar{X}_{vN})}{2N} \right) \quad (2)$$

Donde (N) se define como el número total de espacios libres en líneas específicas, ( $x_h$ ) línea horizontal y ( $x_v$ ) línea vertical.

Espacios libres o distancias entre partícula a menudo no son los mismos debido a la aglomeración de partículas; estos valores dependen de ( $\bar{X}$ ). Debido a que los valores medios del espacio libre son distintos para cada línea y que son dependientes de ( $\bar{X}$ ), se selecciona el coeficiente de variación (CV) para evaluar la variación relativa de cada espacio libre en todas las líneas y así determinar la distribución mediante la siguiente formula (3).

$$D_{\text{Index}} = C_v = \left( \frac{S}{\bar{X}} \right) \quad (3)$$

Donde (D) debe ser 0 para un material compuesto con distribución homogénea y 1 si las partículas están aglomeradas. Entre más alto sea el valor, mayor aglomeración presenta el compuesto. Este método puede relacionarse con el método del cuadrante para cuantificar en función de  $\beta$ , la distribución de partículas<sup>46</sup>.

El método consiste en determinar el número de partículas mediante la selección del tamaño óptimo del cuadrante y del número de cuadrantes a ocupar, que puede variar desde 4 cuadrantes hasta 64 cuadrantes. Al medir las regiones libres de partículas con el tamaño de cuadrante, da como resultado una mala distribución. Este método se puede complementar con la estadística utilizada en el método de distribución utilizando líneas verticales y horizontales y ocupando las ecuaciones 1 y 2 y, determinando  $\beta_{index}$  en vez de  $D_{index}$ <sup>46,47</sup>.

## 2.7 Propiedades Tribológicas.

Los materiales compuestos base aluminio reforzados con partículas cerámicas se han convertido en materiales muy atractivos para el estudio del comportamiento tribológico. Se han estudiado el efecto de la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento, fricción y desgaste<sup>48,49</sup>.

Se ha determinado que agregar refuerzos cerámicos como SiC y WC incrementan la resistencia al desgaste y la fricción dependiendo del porcentaje en volumen de refuerzo agregado. Autores como Sahin<sup>51</sup>, utilizan enfoques estadísticos para determinar la tasa de desgaste en función de la carga aplicada en las distintas partículas abrasivas<sup>50,51</sup>.

La tribología es la rama encargada de estudiar y analizar la resistencia al desgaste y la fricción las cuales, son interacciones microscópicas entre superficies en contacto mecánico y características geométricas que causan disipación de energía y deterioro del material. Las condiciones generales a considerar son por la carga, temperatura, atmósfera circundante, tipo de contacto, aspectos mecánicos, físicos, químicos, geométricos afectan a las interacciones superficiales y características tribológicas<sup>48,49</sup>.

### 2.7.1 Desgaste.

Existen varios tipos de desgaste haciendo referencia al mecanismo de desprendimiento de material a nivel microscópico. El desgaste implica a veces varios mecanismos o una combinación de ellos provocando una eliminación de material que puede ser cuantificado por masa o volumen perdido, distancia o tiempo de deslizamiento, resistencia al desgaste y coeficiente de fricción. La clasificación se presenta a continuación<sup>48,49</sup>:

- a) Desgaste adhesivo. El fenómeno de adhesión por deslizamiento ocurre mediante unión entre dos superficies que están en contacto. Generalmente ocurren fracturas por fatiga que provocan el desprendimiento del material<sup>48,49</sup>.

- b) Desgaste abrasivo. Consiste en la abrasión pura de una superficie que se desliza sobre otra áspera; el desprendimiento de partículas duras o la formación de surcos generan deformación plástica superficial debido al contacto con el abrasivo. En la abrasión pura existe una linealidad entre el volumen de desgaste y la distancia de deslizamiento<sup>48,49</sup>.
- c) Desgaste por fatiga. Mecanismo superficial dado por una fractura cuando es sometido a cargas cíclicas o efectos acumulativos entre dos superficies de contacto. Generalmente se da por propagación grietas que coalescen<sup>48,49</sup>.
- d) Desgaste erosivo. Mecanismo que se genera por la erosión de las partículas sólidas y duras que golpean a la superficie. Este mecanismo al igual que el mecanismo de abrasión involucra deformación plástica como fractura frágil, que depende de las condiciones de impacto, masa de partículas, velocidad y ángulo de impacto. La pérdida de material resulta de los impactos de las partículas sólidas duras<sup>48,49</sup>.

### 2.7.1.1 Ensayo de Desgaste.

El objetivo del ensayo es estudiar el comportamiento de un material y su respuesta a cada mecanismo de desgaste que será simulado a ciertas condiciones de carga, tratando que sea lo más realista en función del costo, tiempo y control de la prueba<sup>48,49</sup>.

La técnica más utilizada para evaluar el desgaste consiste en pesar muestras sometidas a desgaste cada cierto tiempo y medir los cambios dimensionales para tener una relación del volumen desgastado y comparar con el peso del componente. Posteriormente se pueden complementar con técnicas de microscopía para identificar el daño superficial que se establece en la vida útil del material. Los distintos equipos empleados se muestran en la figura 2.19; los más utilizados son deslizamiento de disco (a) y el de tambor (c)<sup>49,50</sup>.

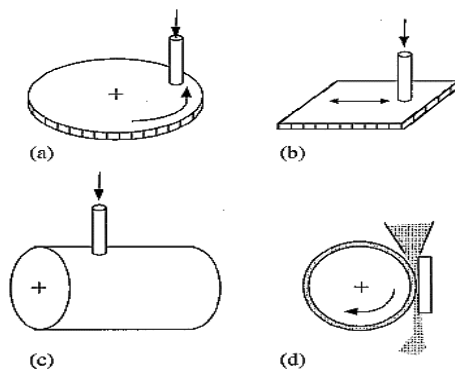


Figura 2.19. Pruebas de desgaste abrasivo, (a) deslizamiento de disco, (b) deslizamiento rectilíneo, (c) deslizamiento de tambor y (d) deslizamiento de rueda de goma según la ASTM G65<sup>49</sup>.



La norma ASTM G99<sup>60</sup> es la más utilizada en ensayos de desgaste; describe el procedimiento de desgaste utilizando el aparato de deslizamiento de disco (pink-on disk) como se observa en la figura 2.19 pero frecuentemente es adaptada al deslizamiento por tambor (pin-on-drum). Los materiales son probados bajo condiciones no abrasivas<sup>50,52</sup>.

Este método depende de la carga aplicada, la velocidad acumulada de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, temperatura y tipo de atmósfera, todo en función de la masa perdida medida cada cierto tiempo de prueba<sup>49,52,53</sup>.

### 2.7.1.2 Curva de Desgaste-Carga Aplicada.

Esta curva permite determinar el comportamiento del material debido a una carga aplicada en función del desgaste ocurrido en el material; el proceso de desgaste pasa por tres etapas como se muestra en la figura 2.20<sup>53</sup>.

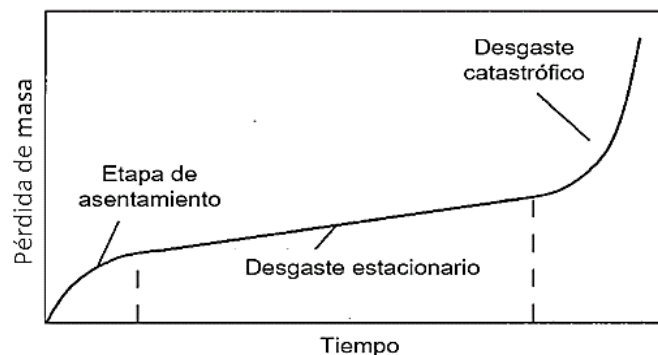


Figura 2.20 Curva de pérdida de desgaste en función de su tiempo con las etapas importante<sup>53</sup>.

- I. Etapa de asentamiento: etapa inicial en la que la superficie de acoplamiento se conforma de manera que la carga es distribuida sobre las superficies. Durante esta etapa, el desgaste puede ser relativamente alto y muchas veces la vida útil del componente es corta<sup>53</sup>.
- II. Estado estable: etapa en la que el desgaste mantiene un cambio pequeño y permanece constante<sup>53</sup>.
- III. Desgaste Catastrófico: el nivel de desgaste es alto y se produce daño superficial severo<sup>53</sup>

## 2.8 Propiedades Mecánicas.

### 2.8.1 Ensayo de Compresión.

La respuesta a la compresión en los materiales compuestos reforzados con partículas ha sido de interés debido a los factores que influyen en la respuesta del material a nivel macro y microestructural (partículas, matriz, presencia de defectos locales, etc.). Las pruebas de compresión se realizan con el objetivo de determinar el comportamiento del material bajo deformaciones permanentes o grandes<sup>54,55</sup>.

En este ensayo una carga o fuerza axial denominada esfuerzo de “compresión” se aplica a lo largo de la dirección de la fuerza. Las probetas están diseñadas de forma cilíndrica y de distinto tamaño con alineado axial; como resultado se obtienen curvas esfuerzo-deformación similares a la mostrada en la figura 2.21<sup>54</sup>.

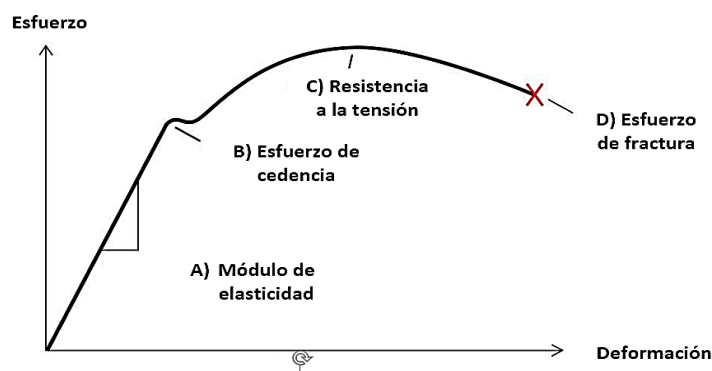


Figura 2.21 Curva esfuerzo-deformación con los puntos críticos, donde (A) es el límite elástico o de proporcionalidad, (B) esfuerzo a la cedencia y donde se inicia la deformación plástica, (C) resistencia a la tensión y (D) esfuerzo a la fractura<sup>56</sup>.

La deformación elástica mostrada en la figura 2.22, es la deformación del material e implica la activación de mecanismos de deformación proporcionales a la tensión del material. Una forma conveniente de interpretación es por medio de la rigidez, es decir, la zona donde el material soporta toda la carga aplicada y que es simbolizada como módulo de Young<sup>55</sup>.

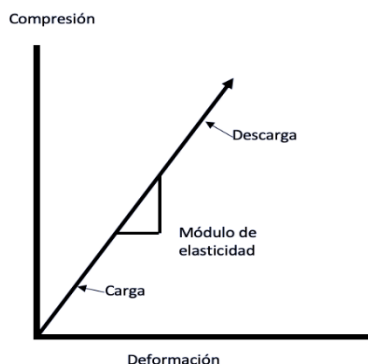


Figura 2.22 Diagrama esquemático del esfuerzo de compresión-deformación.

Cuando mayor es el módulo de Young, el material será más rígido (menor la deformación elástica). La deformación elástica se manifiesta como pequeños cambios en la red atómica y los enlaces tienden a aumentar su tamaño, lo que hace que los átomos se separen<sup>54,58</sup>. El módulo de Young se expresa como

$$\sigma = E\epsilon \quad (4)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo en MPa,  $\epsilon$  es la deformación (mm/mm) y E es el módulo de Young en Pa.

El punto que divide el comportamiento elástico y plástico es el esfuerzo de cedencia. Al llegar a este punto las probetas comienzan a presentar un abarrilamiento hasta tal punto que se torna en agrietamiento y falla del material<sup>54,58</sup>.

## Capítulo 3.

### Desarrollo Experimental

En el siguiente capítulo se detalla la metodología seguida en este trabajo. Previamente, los polvos empleados (matriz y refuerzo cerámico) fueron caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido. Después se detalla el método de fabricación de las muestras de material compuesto de la aleación 6061 con diferentes porcentajes 1, 2, 3, 4 y 5% en peso de partículas de refuerzo. Posteriormente se detalla la preparación y caracterización microestructural, mecánica y tribológica de los materiales fabricados.

#### 3.1 Propiedades Mecánicas.

Los polvos de aluminio 6061 empleados se obtuvieron vía atomización con aire empleando un flujo de 150 ml/s a una temperatura de 280° C. Los polvos de carburo de silicio y tungsteno fueron adquiridos a la NanGong XinDun alloys Co. Ltd. Cabe resaltar que en el presente trabajo no se fabricaron polvos, sino que solo se caracterizó el material de partida. La composición química experimental de los polvos se muestra en las siguientes tablas; se incluye la composición nominal de la aleación y los refuerzos cerámicos utilizados.

Tabla 3.1 Composición nominal de la aleación Al/6061.

Material	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Ti	%Al
Al/6061	0.6-0.8	0.70	0.40-0.15	0.15	0.80-1.20	0.04-0.35	0.25	0.15	balance

Tabla 3.2 Composición nominal del refuerzo cerámico SiC<sub>p</sub>.

Material	%SiC	%SiO <sub>2</sub>	%Fe	%Si Free	%C Free
SiC <sub>p</sub>	98.40-98.40	0.50-0.60	0.05	0.35-0.45	0.20-0.30

Tabla 3.3. Composición nominal del refuerzo cerámico WC<sub>p</sub>.

Material	%W	%C	%Co	%Fe
WC <sub>p</sub>	91.2	8.1	0.6	0.1

Primeramente, se llevaron a cabo pruebas de llenado a los tres polvos utilizados con el propósito de encontrar las mejores condiciones y conseguir piezas libres de defectos para los procesos siguientes. Los polvos utilizados para las distintas pruebas fueron pesados en una balanza gravimétrica de marca OHAUS (Pioneer analytical marca PX224/E).

### 3.1.1 Densidad Aparente.

Las condiciones para calcular la densidad aparente de los polvos empleados se especifican en la norma ASTM 212 y se detallan a continuación. Se pesan 11g de polvo y desde una altura de 5 cm, se deja caer el polvo sobre un matraz aforado previamente pesado cuyo volumen debe ser de 5 cm<sup>3</sup> (figura 3.1). El matraz es llenado hasta alcanzar el límite y posteriormente, se pesa la probeta con el polvo; la densidad aparente se calcula empleando la ecuación (5)<sup>55</sup>:

$$P_{aparente} = \frac{m_{polvo+matraz} + m_{matraz}}{V_{matraz}} \quad (5)$$

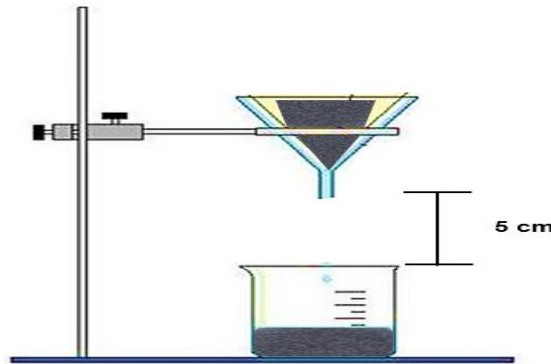


Figura 3.1 Esquema propuesto para la medición de la densidad aparente y velocidad de flujo.

### 3.1.2 Densidad Real.

Las condiciones para determinar la densidad real son las siguientes. Primero se pesa un matraz aforado de 10 ml seco y vacío. Posteriormente se agregan 2g de polvo para volver a medir su peso. Por último, se agrega alcohol etílico, se afora y se pesa. La densidad relativa se calcula a partir de la ecuación (6):

$$\rho_{relativa} = \frac{m_{polvo}}{V_{polvo}} \quad (6)$$

En donde

$$m_{polvo} = m_{polvo+matraz} - m_{matraz} \quad (7)$$

$$V_{polvo} = \frac{m_{matraz+alcohol} + m_{polvo} - m_{matraz+polvo+alcohol} - m_{matraz}}{\rho_{alcohol}} \quad (8)$$

### 3.1.3 Velocidad de Flujo.

La velocidad de derrame se mide con base en la norma ASTM B213. Primero se pesan 50g de polvo en un vaso de precipitados. Adecuando un equipo similar al de la norma (figura 3.1) se pone un embudo fijado a un soporte para medir el tiempo que toma el polvo en caer al vaso. La velocidad de flujo se calcula con la ecuación (9)<sup>59</sup>.

$$v = \frac{m_{polvo}}{tiempo} \quad (9)$$

### 3.2 Mezclas de Polvos.

El mezclado de polvos consistió en combinar los polvos de la matriz 6061 con cada uno de los refuerzos (SiC y WC) a fin de obtener una mezcla homogénea de los mismos. El proceso consistió en simular un molino de barras en el que se introdujeron pequeños recipientes con la mezcla de aluminio 6061 y el refuerzo cerámico, como se muestra en la figura 3.2. El mezclado de los polvos se realizó por tiempo de 120 minutos. Este proceso tenía como objetivo homogenizar y lograr una excelente distribución de partículas.

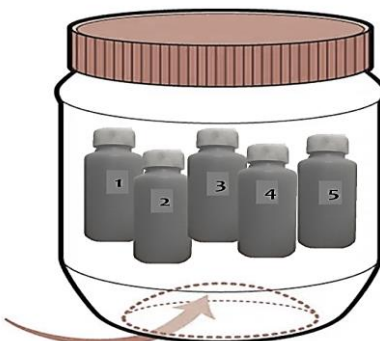


Figura 3.2. Esquema del equipo utilizado para la mezcla de polvos.

### 3.3 Compactación.

Una vez caracterizados y mezclados, los polvos se vaciaron en una matriz cilíndrica (figura 3.3). Previamente, la matriz y el punzón fueron lubricados con aceite orgánico para evitar defectos y disminuir la fricción entre la mezcla de polvos y la matriz cilíndrica. Una vez vaciada la mezcla, la matriz fue colocada en una prensa hidráulica y posteriormente se aplicó una fuerza de 17 MPa para compactar los polvos.



Figura 3.3. Matriz cilíndrica empleada para obtener las piezas compactadas en la máquina de tensión.

### 3.4 Sinterización.

La sinterización es la etapa más crítica de la metalurgia de polvos, donde las piezas adquieren la unión entre partículas y las piezas se consolidan. A fin de encontrar las condiciones óptimas de temperatura y tiempo de tratamiento, se realizó un diseño experimental que incluyó estas dos variables. Las condiciones establecidas se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Condiciones de temperatura y tiempo de sinterización.

Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	500	90
2	500	120
3	500	150
4	550	90
5	550	120
6	550	150

El equipo empleado en la sinterización de las muestras fue una mufla de resistencia LINDEBERG, como se muestra en la figura 3.4. La temperatura fue corroborada mediante un termopar tipo K.



Figura 3.4 Mufla de resistencia utilizada para el proceso de sinterización.

### 3.5 Caracterización y Preparación Microestructural.

Las muestras de material compuesto ya consolidadas se sometieron a una preparación metalográfica para su posterior caracterización microestructural. Primeramente, se les realizó un corte transversal y otro longitudinal; sobre los cortes se realizó una preparación metalográfica. Para el desbaste en grueso se utilizaron lijas de SiC en orden ascendente desde la lija Núm. 240 hasta 1000. El pulido fino se realizó con paño microcloth y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 1 y  $0.3 \mu\text{m}$ .

El revelado de la matriz se realizó empleando un ataque químico por inmersión en HF al 1%. Finalmente, se tomaron microfotografías de todas las muestras (Al

6061-%SiC<sub>p</sub> y Al 6061-%WC<sub>p</sub>) longitudinales y transversales en el microscopio óptico Olympus (modelo PMG3) a 10x, 20x y 50x.

### 3.6 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

A fin de determinar la morfología, tamaño de partícula y la composición de los polvos empleados, estos fueron caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). La preparación consistió en el desengrasado y secado de las muestras usando un solvente orgánico (acetona y alcohol). A continuación, con una espátula son vertidos en cinta de grafito, presionados ligeramente para asentarlos y golpeados ligeramente para eliminar el exceso de material. El equipo empleado fue un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-5900 LV a un voltaje de aceleración de 15 kV.

### 3.7 Cuantificación y Distribución de Refuerzo Cerámico.

Para determinar la distribución de los refuerzos de SiC y WC sobre la matriz de aluminio 6061, se realizó una cuantificación de partículas empleando microfotografías a 10x; se utilizó el software de procesamiento de imágenes IMAGE PRO PLUS para ello. Mediante el método del cuadrante y el método modificado de análisis de homogeneidad, se determinaron parámetros estadísticos con el objetivo de calcular el grado de distribución  $\beta$  o índice de homogeneidad de cada refuerzo.

Para determinar la distribución del refuerzo las microfotografías fueron divididas en cuadrantes sobre los cuales se realizó el conteo de partículas, como se muestra en la figura 3.5.

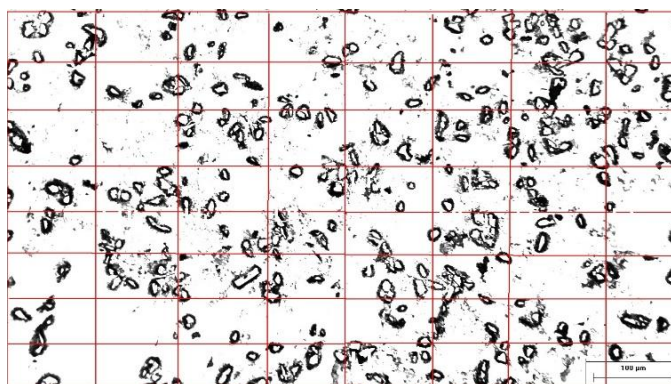


Figura 3.5. Imagen del material compuesto Al/6061-%SiC dividida en 64 cuadrantes a 100x para determinar la cuantificación de partículas.

La figura 3.6 muestra el índice de homogeneidad con base en el valor obtenido de  $\beta$  donde  $\beta = 0$ , representa una alta homogeneidad y una  $\beta \geq 0.6$ , una baja homogeneidad.



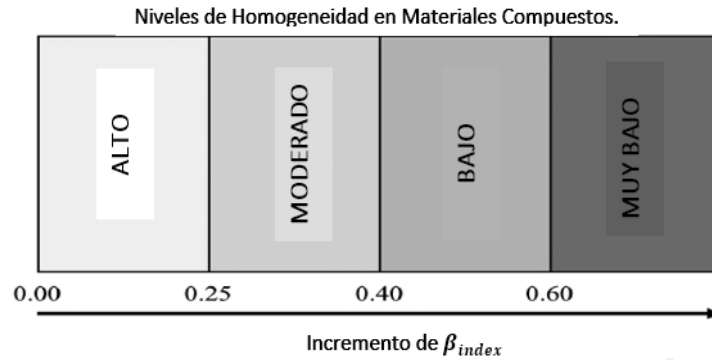


Figura 3.6 Clasificación de los niveles de homogeneidad (grado de distribución) para materiales compuestos basados en rangos del índice  $\beta_{index}$ .

### 3.8 Ensayo de Desgaste.

La prueba de desgaste se llevó a cabo según la norma ASTM G99 con un equipo tipo disk-pin-drum. El ensayo consiste en aplicar una carga constante sobre una muestra colocada de forma perpendicular sobre un rodillo de acero el cual gira a altas revoluciones, como se observa en la figura 3.7. Las condiciones empleadas en el ensayo fueron: carga de 3.35 kg y velocidad constante de 980 rpm.

Las dimensiones de las muestras fueron: diámetro 19.95 mm y altura de 20.99 mm. En el ensayo de desgaste se midió la masa perdida cada 15 minutos durante 4 horas. Para que las superficies del disco no se atascasen del compuesto, se utilizó papel lija para asegurar un buen contacto con la superficie del disco de acero y una limpieza con acetona para evitar que fallara. Las muestras se limpiaron con alcohol y se pesaron (hasta una precisión de 0,01 mg usando una balanza analítica marca OHAUS) antes y después de cada prueba<sup>60</sup>.



Figura 3.7. Sistema utilizado en el ensayo de desgaste tipo disk-pin-drum.

### 3.9 Ensayo de Compresión.

El ensayo se realizó según la norma ASTM E9 empleando una máquina de tensión marca MTS, modelo 661.23B, con una capacidad de 250 KN, como se observa en la figura 3.8. Cada muestra fue colocada entre los dados de la máquina de tensión de modo que ambas caras tocaran los dados para que la carga aplicada se distribuyera perfectamente sobre toda la probeta durante el ensayo de compresión<sup>61</sup>. La carga fue aplicada hasta que la muestra se deformó y alcanzó la fractura. Las dimensiones iniciales de las probetas se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Dimensiones iniciales de las probetas de compuestos base Al/6061.

Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)
Al 6061	20.95	19.87
Al6061-%SiCp	20.98	19.95
Al6061-%WCp	20.99	19.92



Figura 3.8. Máquina de compresión (marca MTS, modelo 661.23B).

## Capítulo 4.

### Resultados y Análisis de Resultados.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos estos son clasificados en caracterización de polvos, técnicas de análisis microscópicos, ensayos mecánicos y tribológicos.

#### 4.1 Caracterización de Polvos.

##### 4.1.1 Análisis Químico.

Se realizó un análisis químico de los polvos de aluminio empleados como matriz; la composición química de estos se muestra en la tabla 4.1. El porcentaje de Fe por arriba del promedio se atribuye a una posible contaminación durante el proceso de fabricación de los polvos. Su presencia puede favorecer la precipitación de fases insolubles que fragilizan el material.

Tabla 4.1 composición química de la aleación 6061.

Elemento	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Ti	%Al
Real	0.70	0.85	0.25	0.14	1.26	0.24	0.24	0.14	balance
Nominal	0.4- 0.80	<0.70	0.15- 0.40	<0.15	0.80- 1.20	0.04- 0.35	<0.25	<0.15	balance

##### 4.1.2 Densidad Aparente, Densidad Real y Velocidad de Flujo.

A continuación, se muestra los resultados de las pruebas de densidad aparente, densidad real y velocidad de flujo de los cinco distintos porcentajes en masa. Los resultados fueron comparados para determinar su comportamiento en función del nivel de reforzamiento.

Se muestra en la tabla 4.2 un incremento en la densidad aparente conforme el nivel de refuerzo en las mezclas Al/6061-%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-%WC<sub>p</sub> aumenta. El incremento en las mezclas Al/6061-%WC<sub>p</sub> es mayor que en las mezclas Al/6061-%SiC<sub>p</sub>. Los valores reportados permiten afirmar que la mezcla Al/6061-%WC<sub>p</sub> presenta un mejor acomodo de las partículas matriz-refuerzo por lo que la densidad aparente en estas mezclas es mayor. Lo antes mencionado se atribuye a la amplia diferencia en el tamaño de las partículas de la matriz y el refuerzo. En el caso de las partículas de carburo de silicio, el tamaño de estas partículas es similar al de los polvos de Al/6061 lo cual contribuye a la mayor presencia de huecos entre partículas lo que se traduce en una cantidad mayor de aire atrapado.

Tabla 4.2. Valores promedio de la densidad aparente, densidad real, velocidad de flujo y densidad teórica.

Material	$\rho_{aparente}$ $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	$\rho_{real}$ $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	$\rho_{teórica}$ $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	% <i>error</i> = $\left(\frac{\rho_{teórica} - \rho_{real}}{\rho_{teórica}}\right) \times 100$	Velocidad de flujo $\left(\frac{s}{50g}\right)$
Al-6061	1.112	2.664	2.70	1.33	2.627
SiC <sub>p</sub>	1.632	3.147	3.21	1.96	3.187
WC <sub>p</sub>	13.987	15.562	15.63	0.43	15.597
Al-1%SiC <sub>p</sub>	1.129	2.684	2.705	0.776	2.691
Al-1%WC <sub>p</sub>	1.478	2.804	2.829	0.884	2.801
Al-2%SiC <sub>p</sub>	1.131	2.689	2.71	0.775	2.699
Al-2%WC <sub>p</sub>	1.579	2.891	2.958	2.265	2.901
Al-3%SiC <sub>p</sub>	1.337	2.697	2.715	0.663	2.702
Al-3%WC <sub>p</sub>	1.748	2.987	3.087	3.24	2.941
Al-4%SiC <sub>p</sub>	1.348	2.709	2.72	0.404	2.714
Al-4%WC <sub>p</sub>	1.874	3.190	3.217	0.839	3.184
Al-5%SiC <sub>p</sub>	1.357	2.721	2.725	0.147	2.718
Al-5%WC <sub>p</sub>	1.947	3.301	3.347	1.374	3.378

La densidad real presenta el mismo comportamiento que la densidad aparente; al aumentar el porcentaje en masa de refuerzo, la densidad real aumenta. El parámetro de comparación es la densidad teórica obtenida mediante la regla de las mezclas (Anexo A.2).

En este ensayo no se considera como significativa la presencia de poros, el tamaño o la morfología de las partículas debido a que los huecos presentes son llenados con el volumen de alcohol adicionado. Si bien, gran parte de estos huecos son ocupados apenas la densidad real igualará la densidad teórica debido a la dificultad de eliminar el volumen ocupado por el aire.

Los resultados muestran que el porcentaje de error entre la densidad teórica y la aparente es mayor cuando la partícula de refuerzo es de menor tamaño que la matriz para todos los niveles de reforzamiento. La diferencia entre estas densidades nuevamente se puede relacionar a la dificultad de llenar huecos más pequeños: a menor cantidad de aire, mayor compactación del polvo, es decir, mayor interconexión entre las partículas. Aunque el error es mayor en las mezclas que involucran carburo de tungsteno, estos valores indican indirectamente que, estas mezclas requerirán menor carga durante el proceso de compactación, así como un menor tiempo de sinterización debido a la menor distancia entre

partículas. Por último, se determinó la velocidad de flujo del polvo o fluidez la cual depende de la fricción de las partículas al fluir el polvo por una cavidad normalizada a fin de caracterizar el proceso de llenado del molde durante la compactación de la mezcla y tener una idea de la mayor o menor facilidad del polvo para rellenar matrices complejas. Se puede observar que la velocidad de flujo aumenta conforme incrementa el porcentaje másico de refuerzo en ambas mezclas, alcanzándose los mayores valores cuando el refuerzo es WC. El incremento en el porcentaje de refuerzo disminuye el tiempo de flujo de 18.6 s a 18.4 s cuando emplea SiC en un 1% y 5%, respectivamente. Al emplear WC los resultados son similares pero el tiempo de flujo presentó una disminución más notable al pasar de 17.8 s a 14.8 s para 1% y 5% de reforzamiento, respectivamente.

Los tiempos de flujo son inversamente proporcionales a la tasa de flujo por lo que, un menor tiempo de llenado refleja una mayor velocidad de flujo de los polvos. La producción de componentes mediante pulvimetalurgia requiere de velocidades de llenado elevadas desde el contenedor hasta el molde. Los polvos de WC al ser más finos no fluyen a través del pequeño orificio a la misma velocidad que los de SiC y los de la matriz de aluminio 6061. Esto se debe al incremento del área superficial específica conforme el tamaño de partícula disminuye. Para las partículas de WC el tiempo de llenado fue de 3.2 s mientras que para el SiC y la matriz de Al/6061 fueron 15.7 y 19 s, respectivamente.

Lo anterior guarda relación con los valores obtenidos de la densidad aparente; entre mayor es el valor de la densidad aparente, menor es el tiempo de flujo como se aprecia en la tabla 4.2. Cuando el polvo fino de WC se mezcló con el polvo grueso de la matriz de Al/6061, el tiempo de flujo disminuyó independientemente de que las partículas de la mezcla son tanto irregulares como esféricas.

### **4.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).**

La caracterización de los polvos de Al/6061 y de los refuerzos cerámicos (SiC y WC) fue llevada a cabo mediante microscopía electrónica de barrido (MEB); la caracterización consistió en la evaluación morfológica, así como la medición del tamaño de los polvos.

En la figura 4.1 se presenta los polvos de Al/6061, SiC y WC a dos diferentes aumentos mostrando múltiples geometrías. La forma de las partículas afecta tanto a la estética del material reforzado como a su estructura, pudiendo modificar las propiedades mecánicas del mismo. Una morfología esférica o irregular ofrece buenos resultados estructurales puesto que esta morfología contribuye a una óptima unión entre la matriz y las partículas reforzantes y, entre la propia carga. La

morfología del polvo de aluminio/6061 obtenida por atomización con aire está influenciada especialmente por la cantidad de oxígeno que presente en la atmósfera durante el proceso de obtención. Al utilizar oxígeno y no un gas inerte, la morfología obtenida es completamente irregular como se muestra en la figura 4.1 (a) y 4.1 (b). El efecto del oxígeno sobre las partículas formadas se da al final de proceso de sinterización; a mayor cantidad de oxígeno mayor cantidad de óxido superficial formado (Ozbilen et al. 1989)<sup>62</sup>.

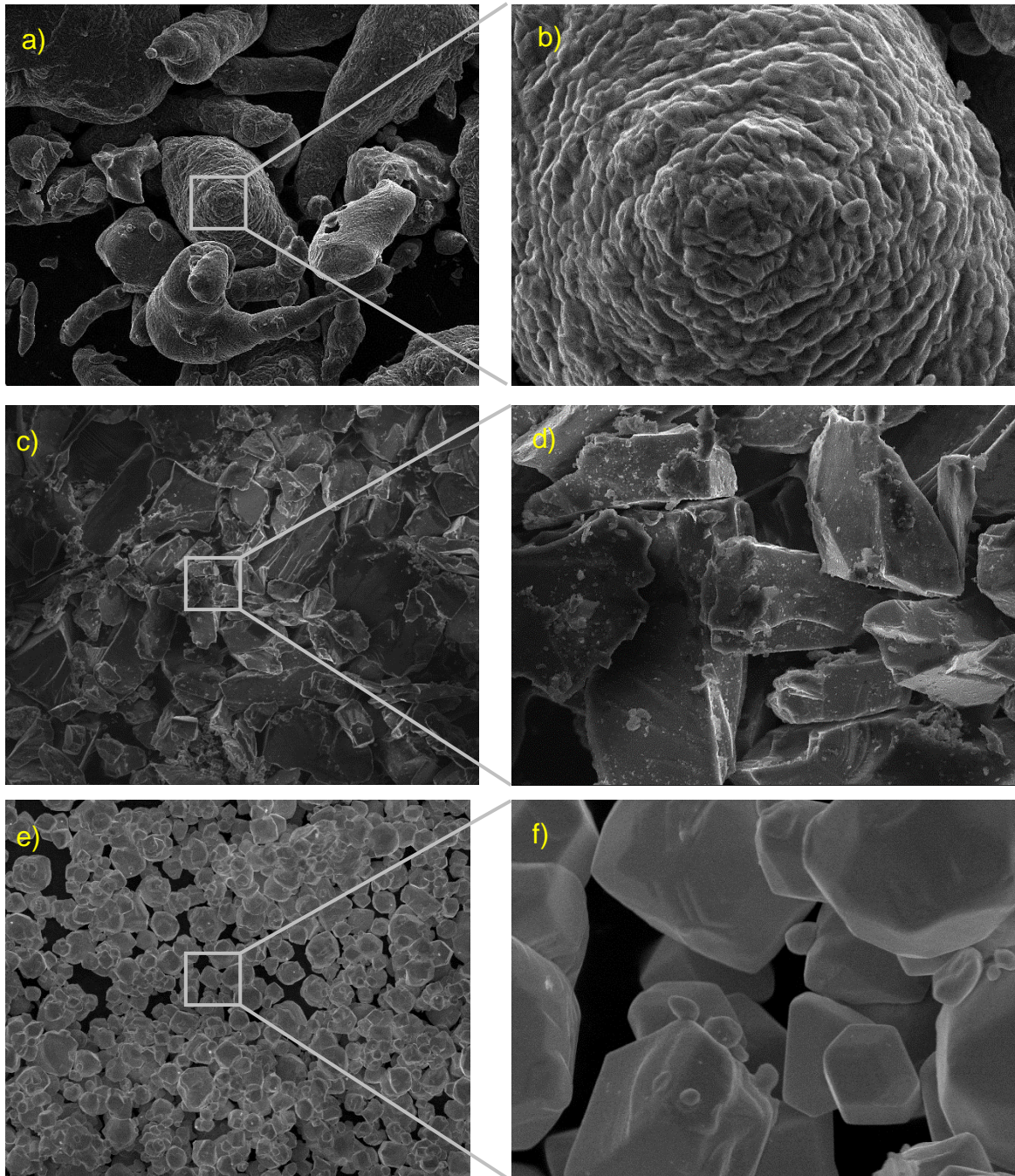


Figura 4.1. Micrografías MEB de los polvos de aluminio 6061 (a y b), carburo de silicio SiC (c y d) y, carburo de tungsteno WC (e y f).

En la figura 4.1 (b), se muestra la superficie de la partícula, con pequeñas irregularidades, aunque no porosidades o fracturas, lo que se podría indicar un buen comportamiento en los procesos posteriores. La producción de partículas duras como SiC y WC.

Karl U. Kainer<sup>63</sup>, generalmente tiene lugar a través de la reacción endotérmica de los óxidos con los elementos. El carburo de silicio, por ejemplo, se produce a partir de una mezcla de arena de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y coque (C), los cuales reaccionan en un horno de resistencia a una temperatura de  $2000^\circ\text{C}$ . Debido al proceso de producción, las partículas presentan una geometría tipo bloque que en su mayoría son de forma irregular, con puntas y bordes afilados como se observa en las figuras 4.1 (c) y figura 4.1 (d).

Sin embargo, las micrografías MEB del refuerzo particulado WC presentan también una morfología irregular, aunque redondeada como se puede apreciar en las figuras 4.1 (e) y figura 4.1 (f). Se ha sugerido que la forma totalmente esférica puede tener un efecto desfavorable en el material compuesto debido a que no se alcanza una interfase continua por lo que la presencia de defectos o reacciones localizadas pueden ser muy habituales (Zulai Li et al. 2018)<sup>64</sup>. Las partículas de WC, aunque son irregulares, no poseen bordes y esquinas muy prominentes y si, una forma octaédrica truncada, como se observa en las partículas de SiC (Bai-Xin Dong et al. 2019)<sup>65</sup>.

La evaluación del tamaño de partícula por medio de la medición del área superficial y asumiendo formas completamente esféricas, no es el método más adecuado para estimar el diámetro de las partículas de Al/6061 las cuales presentan formas más irregulares. La morfología no esferoidal de estas partículas arroja tamaños considerablemente distintos a los reales por lo que resulta necesario evaluar el diámetro medio empleando un programa de análisis de imágenes, figura 4.2.

Para determinar el tamaño de las partículas y determinar tanto el aspecto como el nivel de redondez de los refuerzos, se realizó un análisis de imágenes empleado las micrografías obtenidas por MEB y el programa de análisis IMAGE-PRO PLUS. Los parámetros a determinar fueron:

- Aspecto: indica la relación entre el eje mayor y el eje menor de un cuerpo con forma elíptica equivalente al objeto (es decir, una elipse con la misma área). El aspecto siempre es mayor que 1<sup>64</sup>.
- Diámetro medio: indica la longitud promedio de los diámetros medidos a intervalos de dos grados que unen dos puntos de contorno y pasan por el centroide<sup>64</sup>.

- Redondez: indica la redondez de cada objeto, según lo determinado por la siguiente fórmula:  $perímetro^2 / (4\pi \cdot área)$ . Los objetos circulares tendrán una redondez =1; otras formas tendrán una redondez  $>1$ <sup>64</sup>.

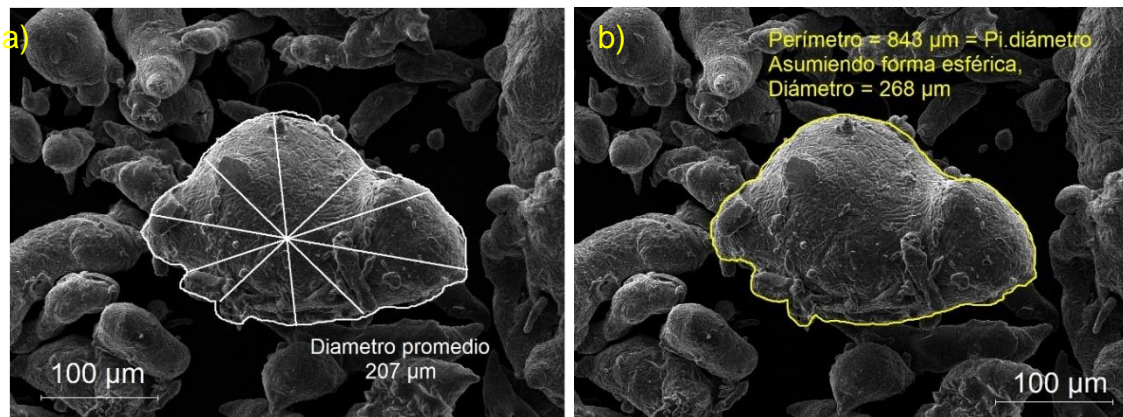


Figura 4.2. Medición del diámetro de partícula de Al/6061 mediante: a) diámetro medio y, b) asumiendo forma esférica.

Las figuras 4.3-4.5 muestran las micrografías de las muestras estudiadas, así como los histogramas de los parámetros cuantificados. En la figura 4.3 (b), en el histograma se puede determinar el aspecto en relación al número de partículas, teniendo valores en rango de 1 μm a 4 μm con un promedio de 2.34 μm. Al tener valores mayores que 1 ( $AR < 1$ ) las partículas tienen un comportamiento elíptico, De igual modo presenta valores cercanos a 9 la partícula va divergiendo, presentando ya sea un aumento en las medidas de ancho y disminución del largo de la partícula o viceversa<sup>66</sup>.

Continuando con la figura 4.3 (c), la mayor cantidad de partículas de Al/6061 presentan tamaños por debajo de las 50 μm siendo el promedio de 37 μm; sin embargo, este valor puede variar en presencia de aglomeración alcanzándose valores medios de alrededor de las 20 μm. Al tener partículas de distintos tamaños que van desde un rango de 1 μm a 100 μm es recomendable realizar un análisis granulométrico para el control de tamaño de partícula<sup>66</sup>.

Por último, la figura 4.3 (d); el histograma representa la redondez de las partículas del aluminio y se concentra en un tamaño menor a 10 μm, es decir se tiene partículas redondeadas con formas irregulares y no se distinguen las esquinas. Esto se ve influenciado por método de obtención de los polvos de aluminio 6061 por vía atomización con aire, al no tener controlado el proceso las partículas presentan una forma irregular<sup>66</sup>.



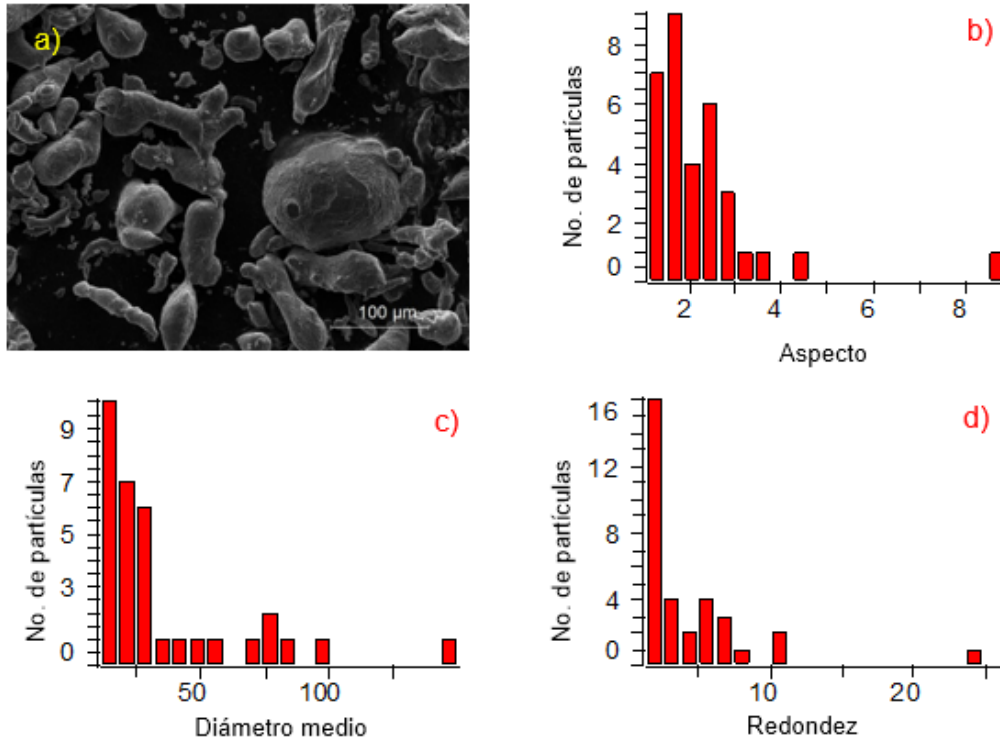


Figura 4.3. Micrografías de los a) polvos de aluminio 6061; b) relación de aspecto; c) diámetro medio, d) redondez de las partículas.

En la figura 4.4b, se presenta el histograma de aspecto en relación al número de partículas, obteniendo valores en rango de 1 µm a 4 µm con un promedio de 2.34 µm. Donde no existe una enorme divergencia en los valores obtenidos teniendo partículas similares entre sí<sup>66</sup>.

De acuerdo a la figura 4.4 (c); la mayor cantidad de partículas de carburo de silicio presentan un intervalo de tamaño que va desde 20 µm hasta 50 µm, teniendo un promedio de 32.5 µm. De acuerdo a los resultados del análisis granulométrico realizado a las partículas de carburo de silicio. El valor promedio de la malla utilizada (37.5 µm) y la cuantificación obtenida está dentro del rango. Sin embargo, se tienen una menor cantidad de partículas que salen del tamaño promedio. Estos valores pueden variar por la presencia de aglomerados y una distribución aleatoria que afecta en la medición de las partículas<sup>66</sup>.

En la figura 4.4 (d); el histograma representa la redondez de las partículas de carburo de silicio con valores que van desde 1 µm a 2.5 µm con promedio de 1.77 µm. Las partículas no son redondeadas si no presentan superficies fracturas, múltiples bordes afilados y formas prismáticas dado que los valores son mayores a 1 µm<sup>66</sup>.

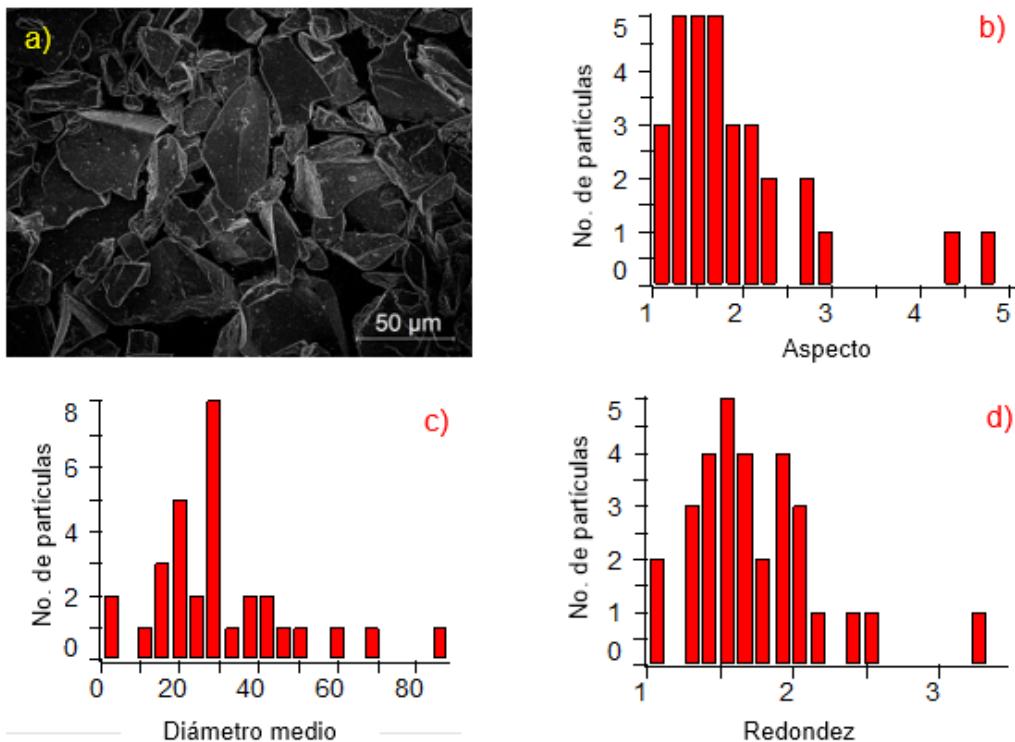


Figura 4.4. Micrografías de los a) polvos de carburo de silicio; b) relación de aspecto; c) diámetro medio, d) redondez de las partículas.

Por último, se presenta la figura 4.5 (b); teniendo resultados de aspecto en relación al número de partículas con valores similares con promedio de 2.97 μm; por lo tanto, al tener valores cercanos a 1 μm, se puede observar una forma elíptica como se muestra en la figura 4.5 (a)<sup>66</sup>.

En la figura 4.5 (c); el diámetro promedio de las partículas de carburo de tungsteno es tan cercano con un rango de 1 μm a 4 μm con promedio de 2.05 μm, teniendo partículas relativamente pequeñas que muestran tendencia a presentar aglomeración. Al tener un rango tan grande de los diámetros no es necesario realizar análisis granulométrico<sup>66</sup>.

Como se muestra en la figura 4.5 (d); representa los valores obtenidos de la redondez de las partículas de carburo de tungsteno que varían de un rango de desde 1 μm a 5 μm con promedio de 3.85 μm. Se tienen partículas esféricas o elípticas casi lisas sin embargo algunas presentan bordes angulares similares a cubos<sup>66</sup>.

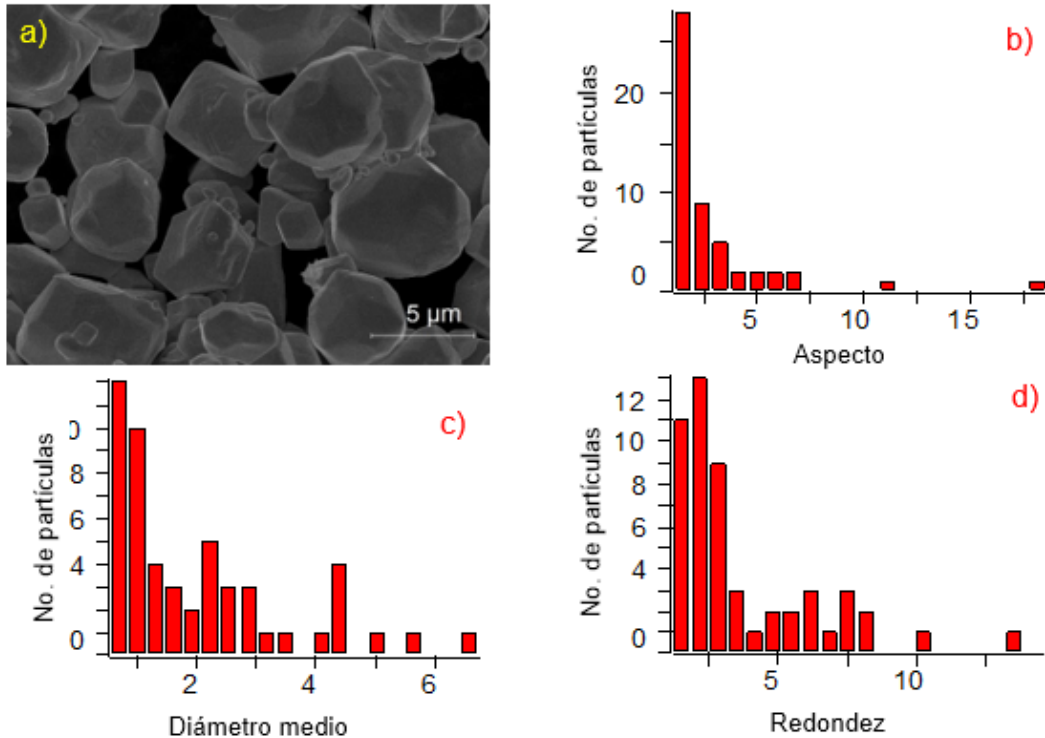


Figura 4.5. Micrografías de los a) polvos de carburo de tungsteno; b) relación de aspecto; c) diámetro medio, d) redondez de las partículas.

En conclusión, se presenta un resumen de los parámetros cuantificados, así como los valores estadísticos de los tres tipos de partículas se muestran en la tabla 4.3. Al tener partículas con valores alejados del promedio puede repercutir en la fabricación del material compuesto debido a que hay partículas que presentan distintas morfologías que están alejadas de un comportamiento esférico y/o redondo que se verá influenciado en los siguientes resultados.

Tabla 4.3. Caracterización de las partículas de acuerdo a su aspecto, diámetro medio y redondez.

Estadísticas	Aspecto			Diámetro medio (μm)			Redondez		
	Al/6061	SiC	WC	Al/6061	SiC	WC	Al/6061	SiC	WC
Min.	1.081	1	1.05	10.86	0.2	0.5	1.19	1	1.20
Max.	8.91	5.06	18.55	150	88.1	6.75	26.17	3.45	14.54
Media	2.34	2.0	2.97	37	32.2	2.05	4.64	1.77	3.85
Std.Dev	1.4	0.91	2.94	31.65	18.52	1.55	4.67	0.47	2.76
Muestras	33	31	53	33	31	53	33	31	53

#### 4.2.1 Microanálisis de Energía Dispersiva por Rayos X (EDX).

Para la identificación positiva de los elementos que conforman los polvos tratados se llevó a cabo un EDX. En la figura 4.6, se muestran los espectros realizados sobre los polvos de la aleación aluminio 6061. La figura 4.6 (b) muestra que el aluminio predomina como elemento en mayor proporción, también se observan pequeñas trazas de elementos como silicio, magnesio, y hierro, dichos elementos corresponden a la composición reportada en la tabla 4.1.

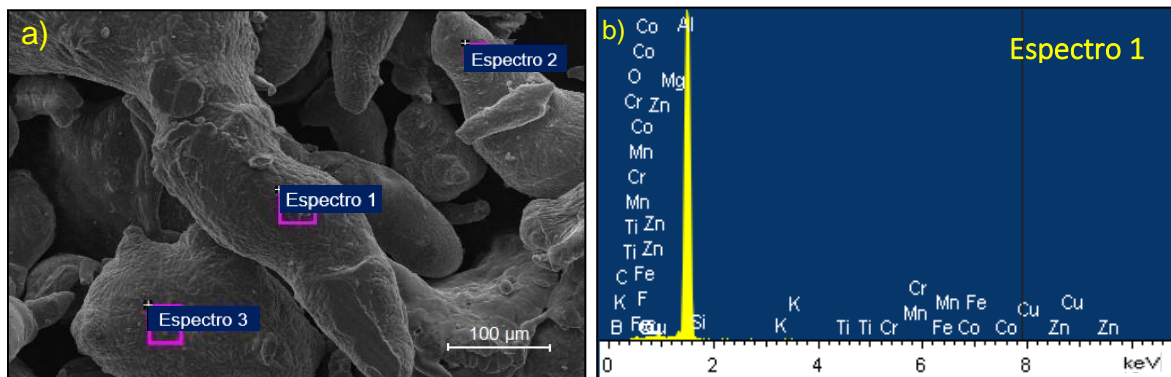


Figura 4.6. a) Micrografía EDX de las partículas de aluminio 6061; b) Espectro 1 realizado a la partícula del polvo de aluminio 6061.

De manera simultánea se realizaron EDX a los refuerzos cerámicos. La figura 4.7 (a) muestra la parte central de las partículas y su composición elemental de las partes más características del carburo de silicio. En la figura 4.7 (b) se visualizan los 2 elementos principales, el silicio como el elemento en mayor proporción seguido del carbono, así como pequeñas trazas de oxígeno y hierro las cuales puedan llegar afectar las propiedades mecánicas del material<sup>67,68</sup>.

Se ha investigado que en la superficie de las partículas de carburo de silicio se forma una película delgada de hasta 1nm de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) que envuelve a la partícula. Como consecuencia puede repercutir en las propiedades como humectabilidad y unión entre la matriz y el refuerzo<sup>67,68</sup>.

Se han desarrollado distintos métodos, electroquímicos, térmicos y húmedos como procesos para la eliminación de contaminantes metálicos, que pueden originarse por el ambiente o distintas fuentes, por lo que se utiliza una limpieza química<sup>69</sup>. La importancia de obtener unas partículas libres de elementos, es la variación en las propiedades, principalmente por la concentración de impurezas metálicas como hierro en la superficie de la partícula de carburo de silicio<sup>69</sup>.

Primero se realiza una limpieza conocida como RCA que es una limpieza química basado en dos pasos. El primero es el uso de una mezcla alcalina ( $5 \text{ H}_2\text{O}:1 \text{ H}_2\text{O}_2$

(30%):1 NH<sub>4</sub>OH (29%)) en un baño ultrasónico por 10 minutos y una temperatura de 70°C con agua desionizada. Posteriormente se limpia con una mezcla ácida de (6 H<sub>2</sub>O:1 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%):1 HCl (27%)) usando un baño ultrasónico. También se puede utilizar ácido fluorhídrico (HF 7%) o ácido fluorhídrico diluido (HF 5%) como limpiador antes del crecimiento de la película de óxido o una combinación con NH<sub>4</sub>OH + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y HCl + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mediante una combinación de distintos procesos de limpieza con ácidos<sup>67,69</sup>.

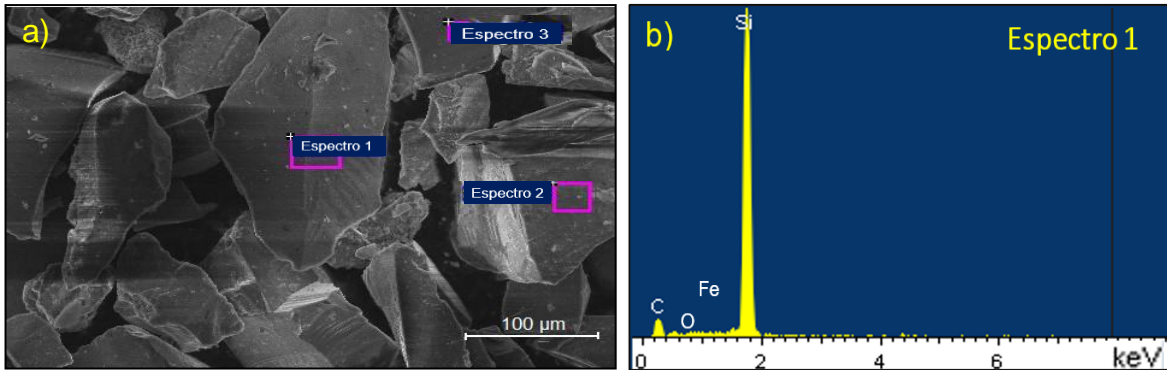


Figura 4.7. a) Micrografía EDX de las partículas de carburo de silicio; b) Espectro 1 realizado a la partícula de carburo de silicio.

En la figura 4.8 (a) muestra los espectros realizados a las partículas de carburo de tungsteno. La figura 4.8 (b) muestra los 2 elementos que forman parte de la composición tungsteno y carbono. Sin embargo, no se pudo cuantificar de manera clara al carbono debido a la interferencia espectral y baja intensidad de las líneas de carbono en los espectros EDX. Del mismo modo no se detectaron otros elementos que influya en la composición de las partículas.

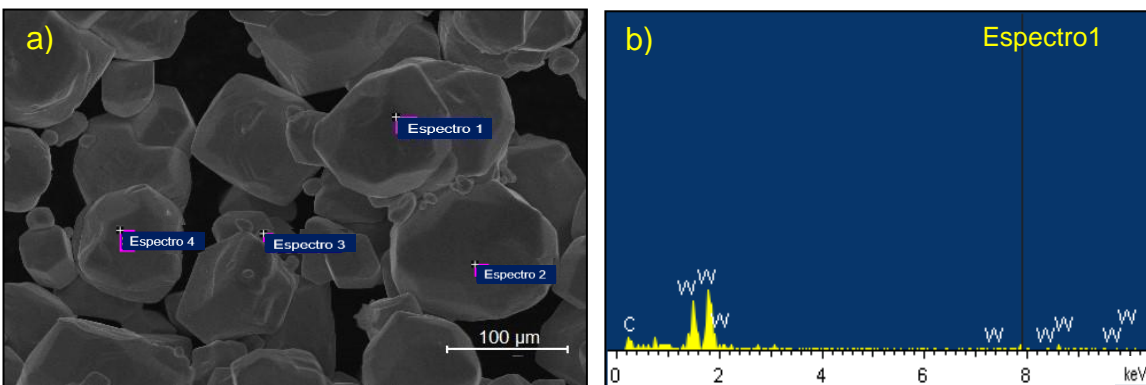


Figura 4.8. a) Micrografía EDX de las partículas de carburo de tungsteno; b) Espectro 1 realizado a la partícula de carburo de tungsteno.

### 4.3 Mezclado, Compactación y Sinterización.

#### 4.3.1 Mezclado.

La combinación de los polvos metálicos y el refuerzo cerámico es uno de los pasos más importantes para la fabricación del material compuesto. Es importante considerar las condiciones que permitiera obtener una distribución uniforme libre de segregaciones o defectos, así como de evitar la formación de aglomerados de partículas. Se encontró un modelo que permitiera determinar las limitaciones geométricas entre matriz-refuerzo con el objetivo de encontrar las condiciones ideales para el mezclado en función del porcentaje de refuerzo, así como la área y volumen de las partículas cerámicas<sup>70</sup>.

Se realizó el mezclado mecánico de los polvos simulando un molino de bolas como se muestra en la figura 4.9. El cual fue sometido a “colisiones” bajas para evitar que las partículas de aluminio y refuerzo cerámico se fracturen, por lo que se estima con un tiempo de 150 minutos de mezclado<sup>70</sup>.



Figura 4.9. Esquema del equipo para el mezclado de los polvos de aluminio con los respectivos refuerzos cerámicos.

#### 4.3.2 Compactación.

Se realizó el proceso de compactación y se tomó como base los resultados obtenidos de densidad aparente, real y velocidad de flujo. El cual fue adecuado para cada nivel de refuerzo y son mostrados en el anexo A.1. Se realizó la curva de compactación en función de la densidad, para encontrar la carga adecuada para la fabricación de las muestras que fueron mezcladas. Se determinó que la carga adecuada es de 17 MPa para los 5 niveles empleados de ambos refuerzos utilizados. Las probetas obtenidas fueron de 2.1 cm de diámetro y 2 cm de altura respectivamente como se muestra en la figura 4.10.

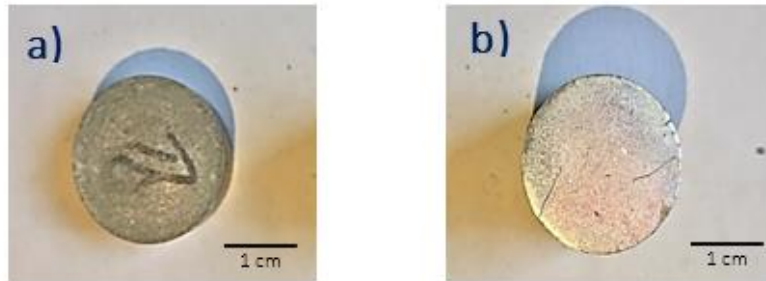


Figura 4.10. Probetas obtenidas del proceso de compactación del material compuesto base aluminio reforzado con a) Carburo de silicio y b) Carburo de tungsteno.

### 4.3.3 Sinterización.

La sinterización es el proceso más importante donde las partículas son unidas a altas temperaturas impulsadas por la energía superficial. Como resultado de este fenómeno es la formación de enlaces entre partícula e interfaz del sólido o poro. Los dos parámetros importantes en el proceso de sinterización son la temperatura y el tiempo, ya que estos determinarán las mejores propiedades mecánicas<sup>71,72</sup>.

La selección de dichos parámetros del proceso de operación se evaluó en estudios previos. El objetivo de la sinterización es generar la unión mediante el desarrollo de enlaces atómicos entre las partículas para proporcionar resistencia al aumentar la temperatura y principalmente evitar la formación de porosidad<sup>71,72</sup>.

Lumler Roger<sup>73</sup> determinó que una alta fracción líquida a una rápida densificación y dificulta un control dimensional que depende de la temperatura, tiempo y atmósfera. Al no ocupar una atmósfera inerte, la sinterización se vuelve un proceso crítico que solo dependerá de la relación temperatura-tiempo<sup>72,84</sup>.

Se ha investigado la importancia de trabajar con dos ciclos de distintas temperaturas, en un intervalo de 500°C hasta las 620°C y tiempos cortos de al menos una hora. Esta investigación se realizó con dos temperaturas de 500°C y 550°C e intervalos de tiempo de 90, 120 y 150 minutos<sup>73,75,76,77</sup>.

La figura 4.11 (a) y figura 4.11 (c) corresponde a la temperatura de 500°C para los tiempos de 90 y 120 minutos se observan que al tener tiempos cortos de sinterización no se logra alcanzar una matriz continua. El límite entre partículas se observa a lo largo del material, aunque en algunas regiones, este límite se pierde o no es del todo observable. Lo anterior puede deberse a la existencia de puntos donde la unión física es mayor (producto de la difusión), lo que permite que el límite entre partículas se pierda, aunque sea de forma localizada. En general se puede concluir que estas condiciones de trabajo no permiten alcanzar la continuidad del material además de que se observa una cantidad de poros debidos a una baja densificación y menor difusividad<sup>73,75,76</sup>.

Al incrementar el tiempo a 150 minutos como se muestra en la figura 4.11 (e), hay una mayor densificación por lo tanto un menor nivel de porosidad en la muestra. Sin embargo, la problemática de esta temperatura es que el proceso de sinterización tendrá limitaciones de densificación, lo que genera un crecimiento significativo del grano perjudicando las propiedades mecánicas<sup>73</sup>.

En la figura 4.11 (b), (d) y (f) con una temperatura de sinterización de 550°C se observa que el comportamiento es similar al utilizar la temperatura de 500°C. Sin embargo, al incrementar el tiempo de sinterización, va disminuyendo la densificación y por ende el crecimiento del grano es mayor. La influencia de la temperatura se ve afectada por la energía de superficie, si se disminuye esta energía, el área de superficie es pequeña por lo que el crecimiento de los poros genera una nueva área límite provocando que crezcan. Este fenómeno se analiza en la figura 4.11(f) donde la muestra presenta granos finos y poros alrededor de toda la matriz ya que el tiempo genera un crecimiento de granos debido a la migración de los límites<sup>75,76</sup>.

Los parámetros óptimos para llevar a cabo el proceso de sinterización son 500°C y 150 minutos; debido a que un tiempo de sinterización largo y una baja temperatura, conduce a un aumento en la distancia de difusión. La presencia de los límites de grano dicta el equilibrio de los poros en la intersección con los límites de grano<sup>73</sup>.



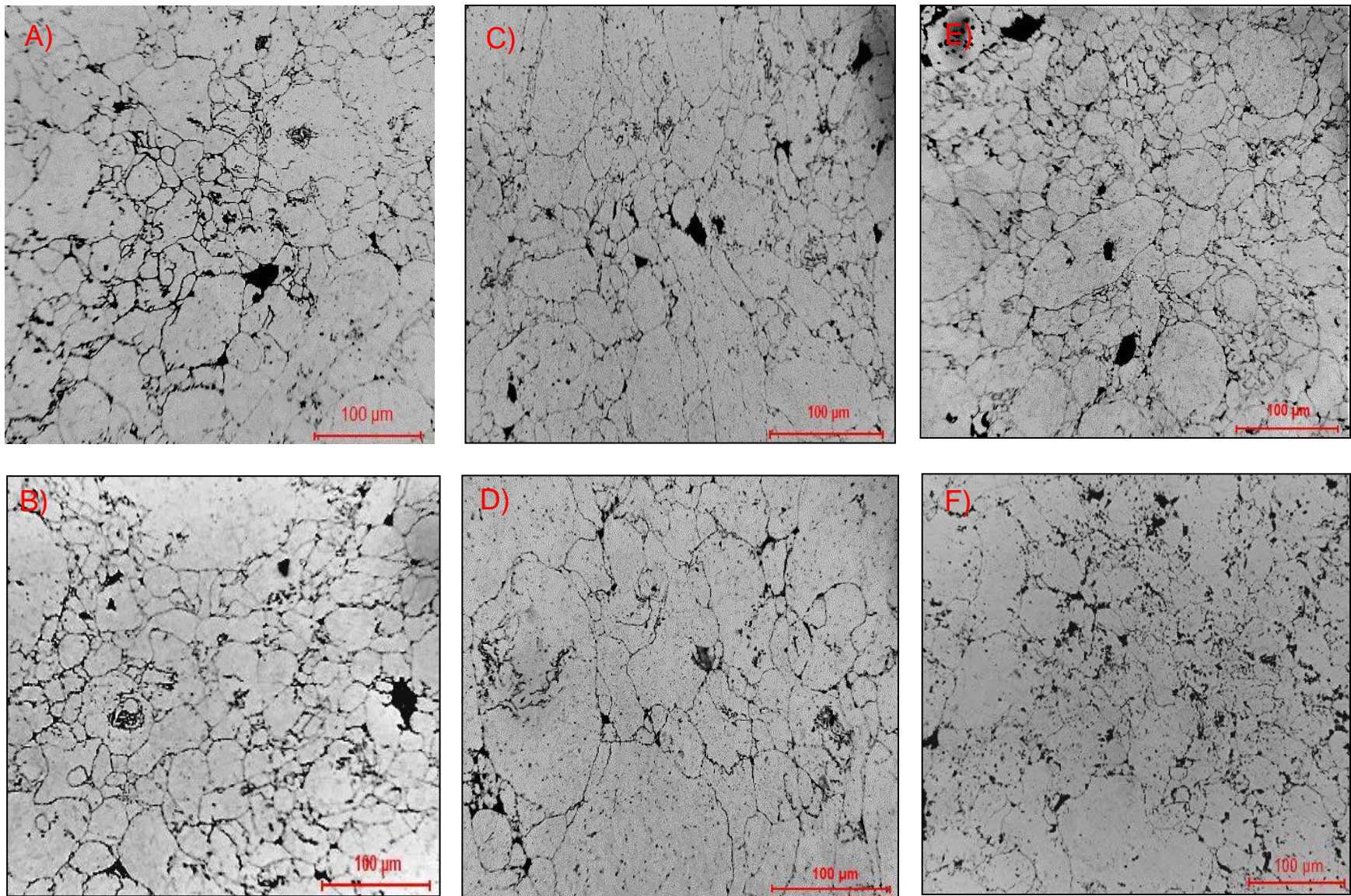


Figura 4.11 Microestructuras de las piezas correspondientes a la sinterización de Al/6061 (A:500°C-90 min., B: 550°C-90 min., C: 500°C-120 min., D: 550°C-120min., E: 500°C-150min., y F:550°C-150min.

#### 4.4 Microscopía Óptica.

Al determinar los parámetros de tiempo y temperatura óptimas para la sinterización de la matriz de aluminio 6061. Se fabricaron diferentes probetas de 1% a 5% en peso, utilizando refuerzos cerámicos de carburo de silicio y carburo de tungsteno. Posteriormente se caracterizaron las probetas, se realizaron cortes transversales y longitudinales para cuantificar la cantidad de partículas en la matriz mediante microscopía óptica.

De la figura 4.13, a la figura 4.20 se muestran las metalografías de los 5 niveles fabricados de Al/6061-%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-%WC<sub>p</sub> de corte longitudinal y corte transversal. Es importante determinar que los parámetros como tamaño, porcentaje y distribución del refuerzo afectan en la variación de la estructura del grano. Las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 (a) son las micrografías ópticas de Al/6061-1%SiC<sub>p</sub> a 10x, la distribución de la partícula de SiC es uniforme, aunque la formación de aglomerados se encuentra en ciertas regiones de la matriz no hay presencia de defectos visibles. A medida que se aumenta el nivel de refuerzo las partículas empiezan a ser más próximas entre sí y los granos empiezan a tener una disminución de tamaño principalmente en las zonas donde la proximidad entre partículas se hace pequeña, este fenómeno se observa en las figuras antes mencionadas en el inciso (b) y (c) del Al/6061-2%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-3%SiC<sub>p</sub> respectivamente.

Para los compuestos de Al/6061-4%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-5%SiC<sub>p</sub>, donde las partículas abarcan gran parte del área, los granos son más pequeños y tienen un tamaño homogéneo. Sin embargo, al tener demasiadas partículas, la distancias entre si se va haciendo pequeña por lo que hay mayor formación de aglomerados de partículas y como consecuencia mayor cantidad de pequeños poros en los alrededores de las partículas como consecuencia de la ausencia de una atmósfera inerte como también se observa en los incisos (d) y (e) en las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16. La porosidad es causada principalmente por las partículas de carburo de silicio actúan como una barrera al movimiento de los límites de grano del aluminio haciendo que se retrase el crecimiento y teniendo granos muy pequeños y finos, como resultado de la sinterización<sup>78</sup>.

C. Padmavathi, Anish Upadhyaya<sup>79</sup> en su artículo determina las condiciones óptimas para determinar una microestructura con granos definidos y con la menor cantidad de defectos principalmente poros en las regiones intergranulares. Al utilizar un refuerzo como carburo de silicio como máximo 10% en volumen presenta una excelente distribución uniforme, al ir aumentando la cantidad de porcentaje existe la formación de aglomerados de partículas que se localizan en

los límites de grano que restringe en una menor densificación y mayor cantidad de porosidad<sup>79</sup>.

En la figura 4.12 se muestra las microestructuras obtenidas a 40x para los refuerzos Al6061/3%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-3%WC<sub>p</sub>. Se muestra con mayor claridad la figura 4.12 (a), en el centro de la imagen se localizan los aglomerados de SiC y puede verse que una distancia vecina corta, el tamaño de grano es pequeño en comparación de las zonas con ausencias de partículas, el área promedio de los granos es de 1140 μm<sup>2</sup>, como se muestra en la tabla 4.4. Similarmente se muestra que los poros se localizan en las zonas con mayor número de partículas y próximas entre sí.

Tabla 4.4. Variación del tamaño de grano y área de grano de la microestructura en función del tamaño de partícula para SiC y WC.

Contenido de refuerzo (wt%)	Diámetro medio de la partícula (μm)		Área promedio de grano (μm <sup>2</sup> )	
	SiC	WC	SiC	WC
1	Min. 0.2	Min. 0.5	1950	2570
2			1710	2140
3	Max. 88.1	Max. 6.75	1140	1800
4			908	1547
5	Media. 32.2	Media. 2.05	750	1204

Para el Al/6061-3%WC<sub>p</sub>, las partículas quedan localizadas en los límites de grano formando aglomeraciones de partículas, como se muestra en la figura 4.12 (b). En comparación con la microestructura de Al/6061-3%SiC<sub>p</sub>, los granos no son finos, ni homogéneos, pero mantienen un área promedio de 1800 μm<sup>2</sup>. Las partículas que están localizadas en los límites de grano rodean en su mayoría a los poros<sup>79</sup>.

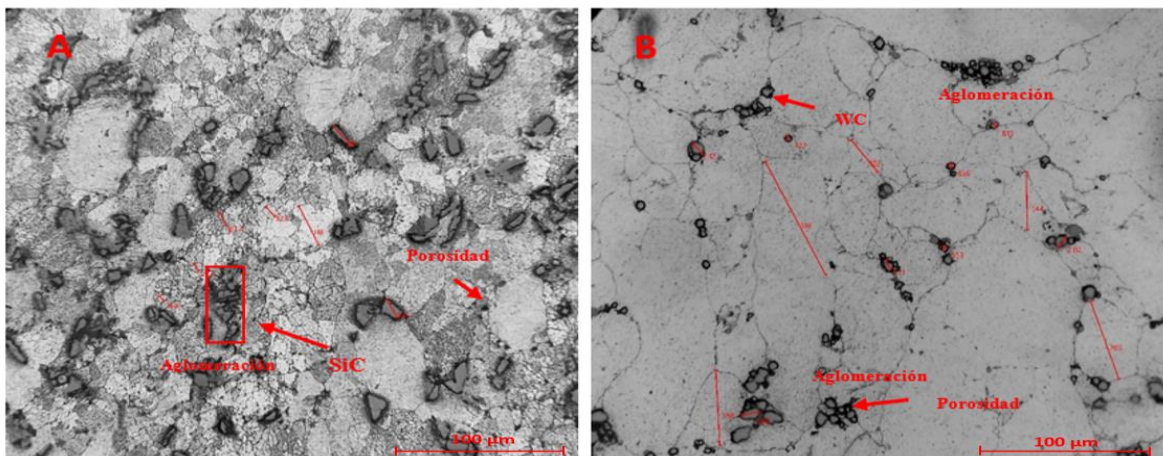


Figura 4.12 Microestructuras representativas de los materiales compuestos a) Al6061/SiC<sub>p</sub> y b) Al6061/WC<sub>p</sub>. Se presenta en un corte transversal de las muestras obtenidas a 40x y un 2% en peso.

Las figuras 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20 muestran las microestructuras de Al/6061-1%WC<sub>p</sub>, de corte vertical y transversal. Para el Al/6061-1%WC<sub>p</sub>, se muestra que todas las partículas quedan localizadas en el límite de grano, formando pequeños aglomerados que rodean principalmente a los poros. En algunas zonas es visible una mala unión y se hace presente en la figura 4.17 (a). Conforme aumenta el porcentaje en peso del carburo de tungsteno, se muestra que en el Al/6061-2%WC<sub>p</sub> y Al/6061-3%WC<sub>p</sub>, las partículas forman mayor cantidad de aglomerados en distintas zonas de la microestructura. Sin embargo, en comparación con el SiC al tener menor densificación debido al tamaño de promedio de la partícula de carburo de tungsteno de 3.85 μm, no actúa como barrera y quedan localizadas en los límites de grano<sup>76</sup>.

El Al/6061-4%WC<sub>p</sub> y Al/6061-5%WC<sub>p</sub>, hay una creciente formación de aglomerados dentro de los límites de grano existe mayor porosidad. Por lo tanto, para el refuerzo de carburo de tungsteno es mayor la presencia de defectos principalmente a una débil comprensibilidad y tamaño de partícula. Cuando se utilizan refuerzos cerámicos “duros” y quebradizas como matriz, estas no suelen deformarse plásticamente, por lo que se obtiene una menor densificación y disminuye al aumentar el porcentaje de refuerzo. La porosidad en este tipo de materiales compuestos aumenta principalmente con cantidades de partículas cerámicas duras como lo reportó H.R. Hafizpour<sup>87</sup>.

Sin embargo, al utilizarse las mismas condiciones de sinterización, el material compuesto reforzado con carburo de silicio presenta mejor calidad de grano y en consecuencia el tamaño de partícula del refuerzo es pequeño por lo que la uniformidad y la dispersión depende totalmente del tamaño de la partícula<sup>87</sup>.

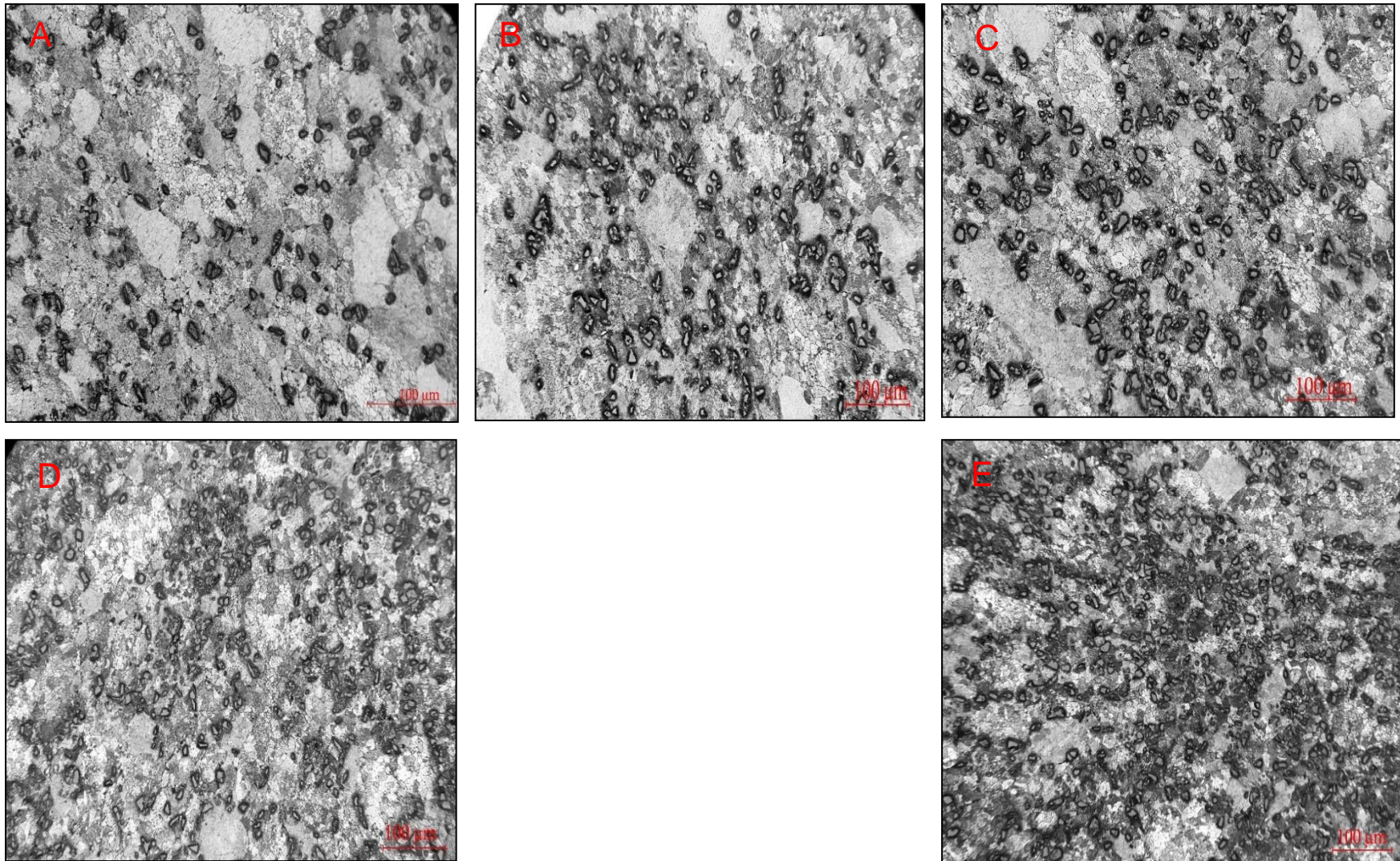


Figura 4.13 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/SiC<sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte transversal de las muestras obtenidas a 100x; a) 1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.

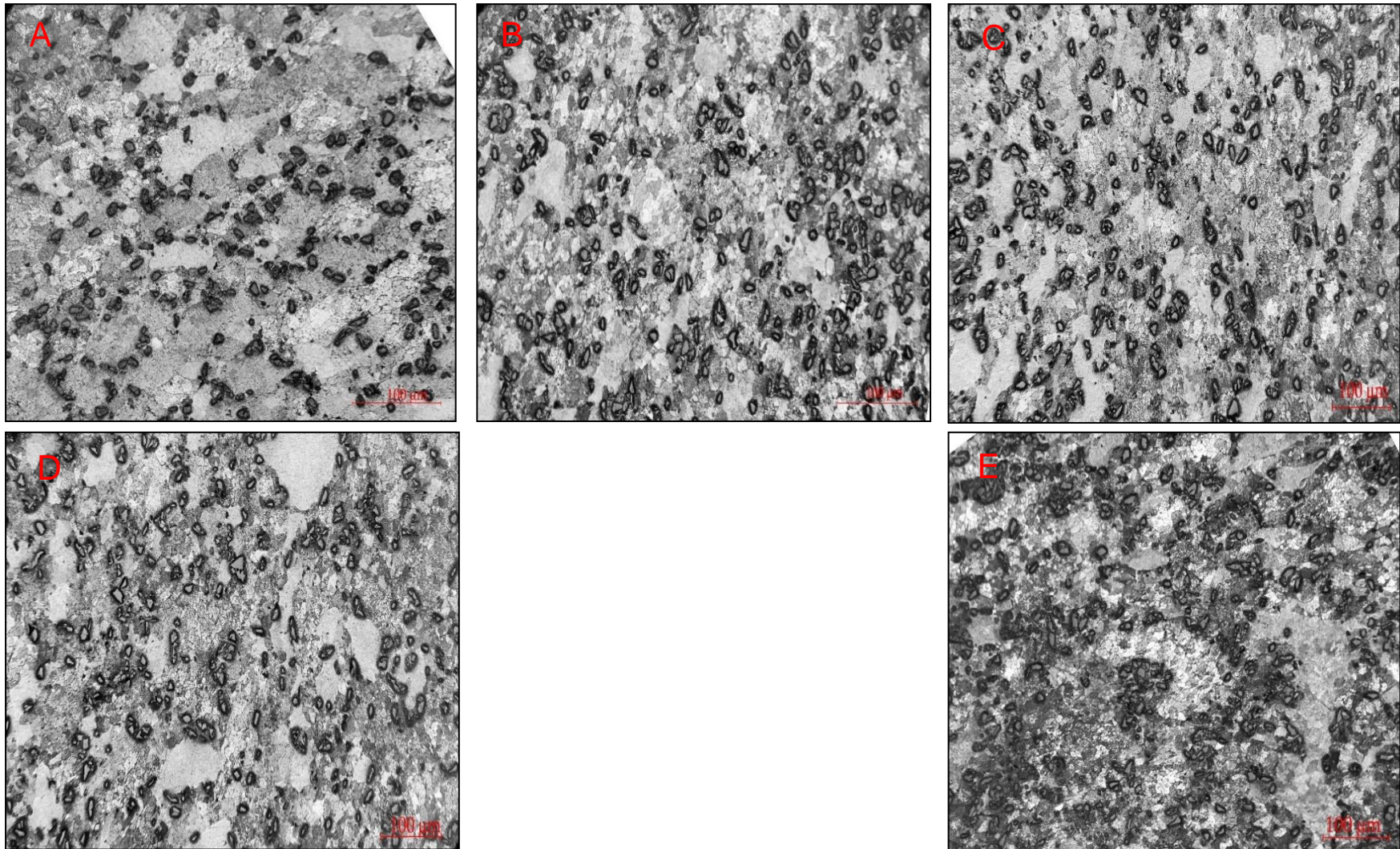


Figura 4.14 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/SiC<sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte transversal de las muestras obtenidas a 100x; a) 1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.

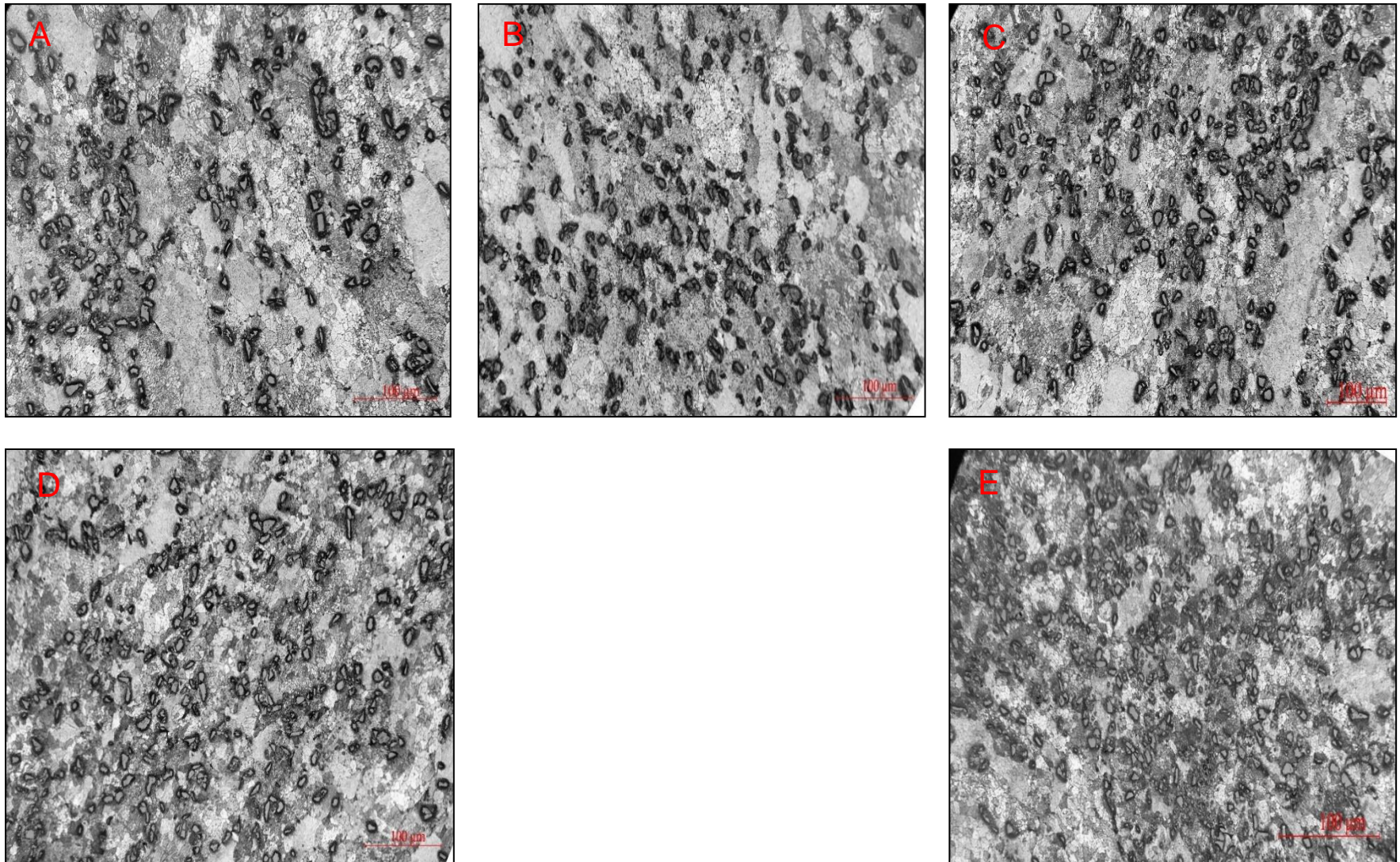


Figura 4.15 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/SiC<sub>p</sub>, a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte longitudinal de las muestras obtenidas a 100x; a) 1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.

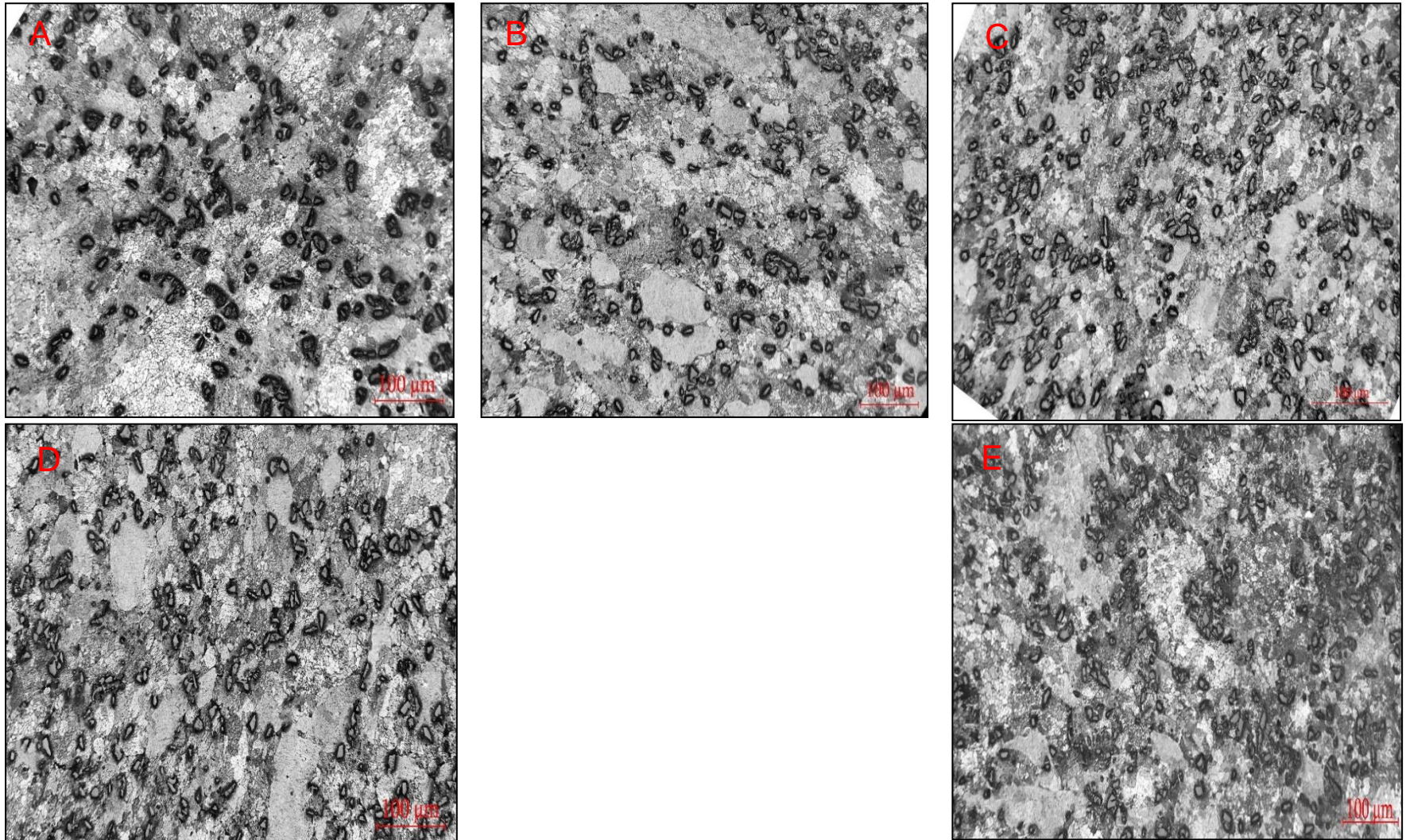


Figura 4.16 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/SiC<sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte longitudinal de las muestras obtenidas a 100x; a) 1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.



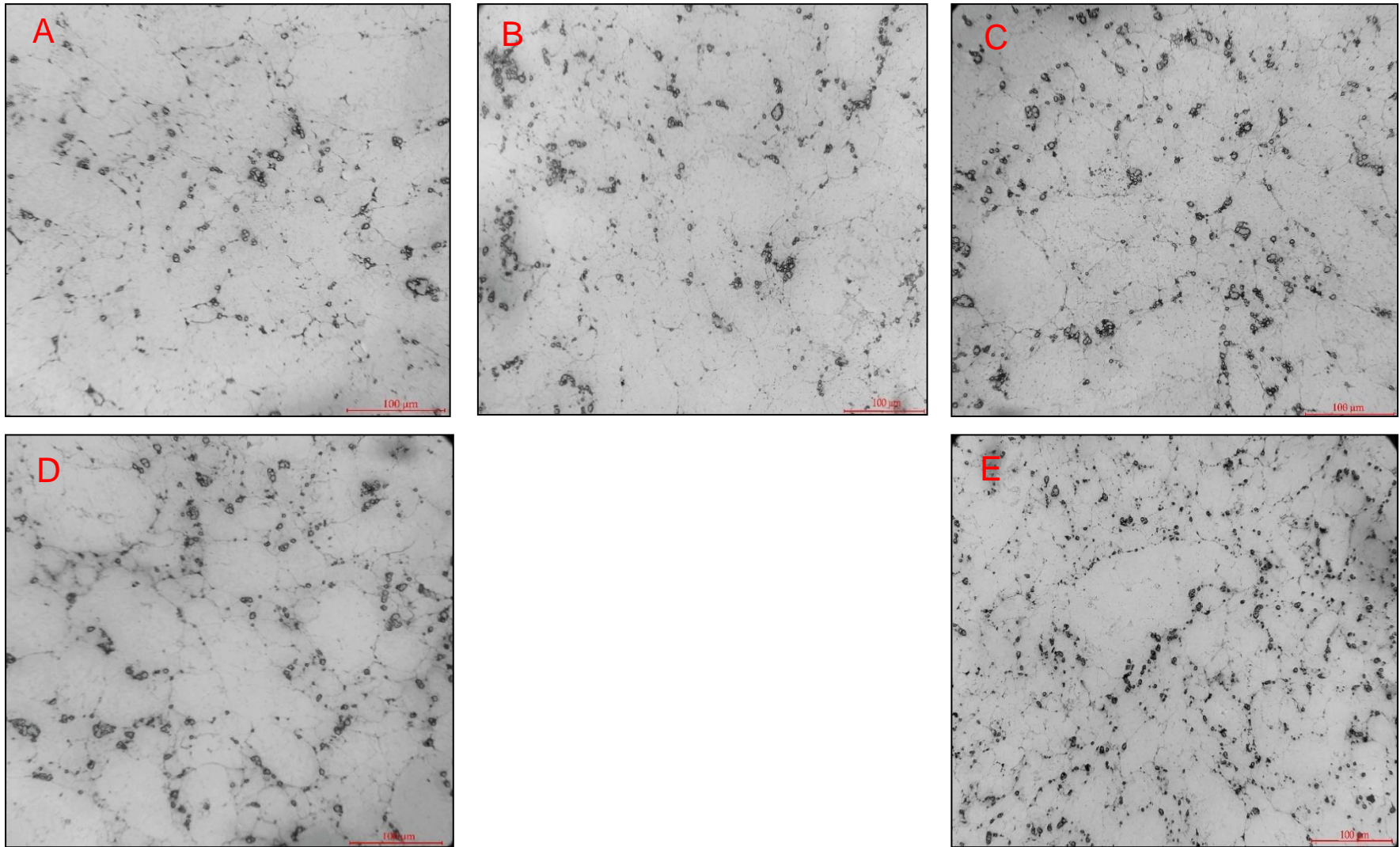


Figura 4.17 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/WC<sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte transversal de las muestras obtenidas a 100x; a) 1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.

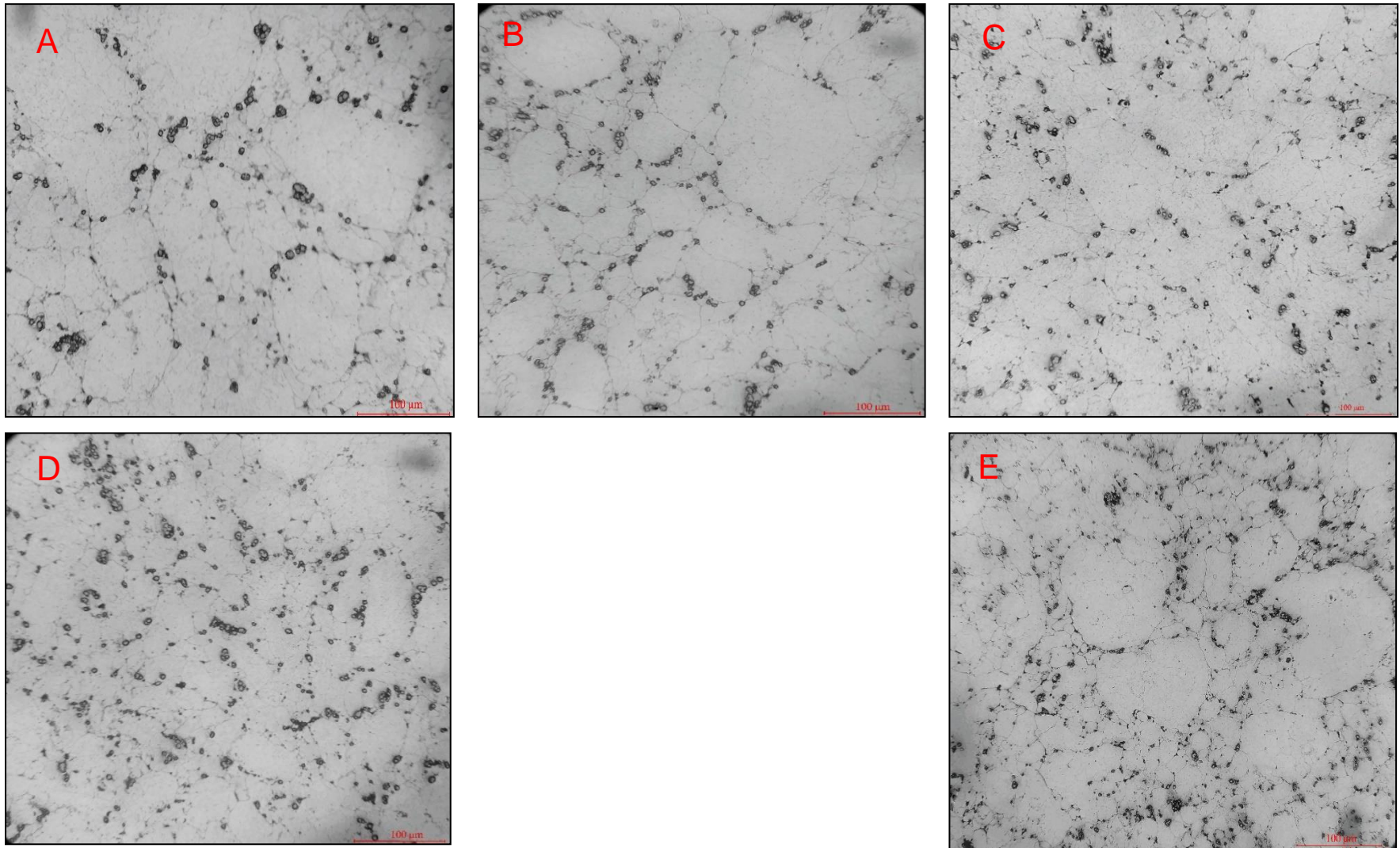


Figura 4.18 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/WC<sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte transversal de las muestras obtenidas a 100x; a) 1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.

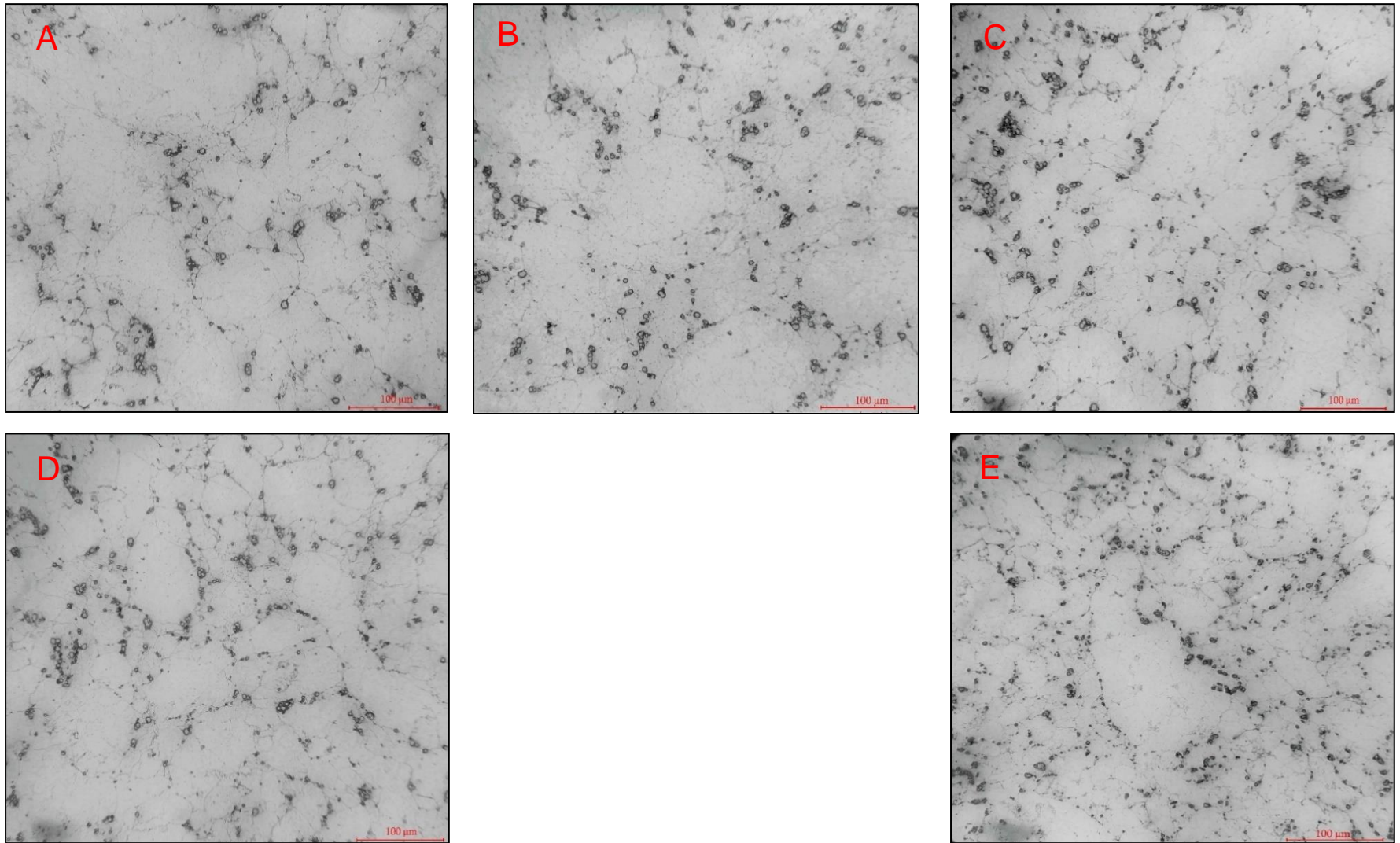


Figura 4.19 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/WC<sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte longitudinal de las muestras obtenidas a 100x; a) 1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC.

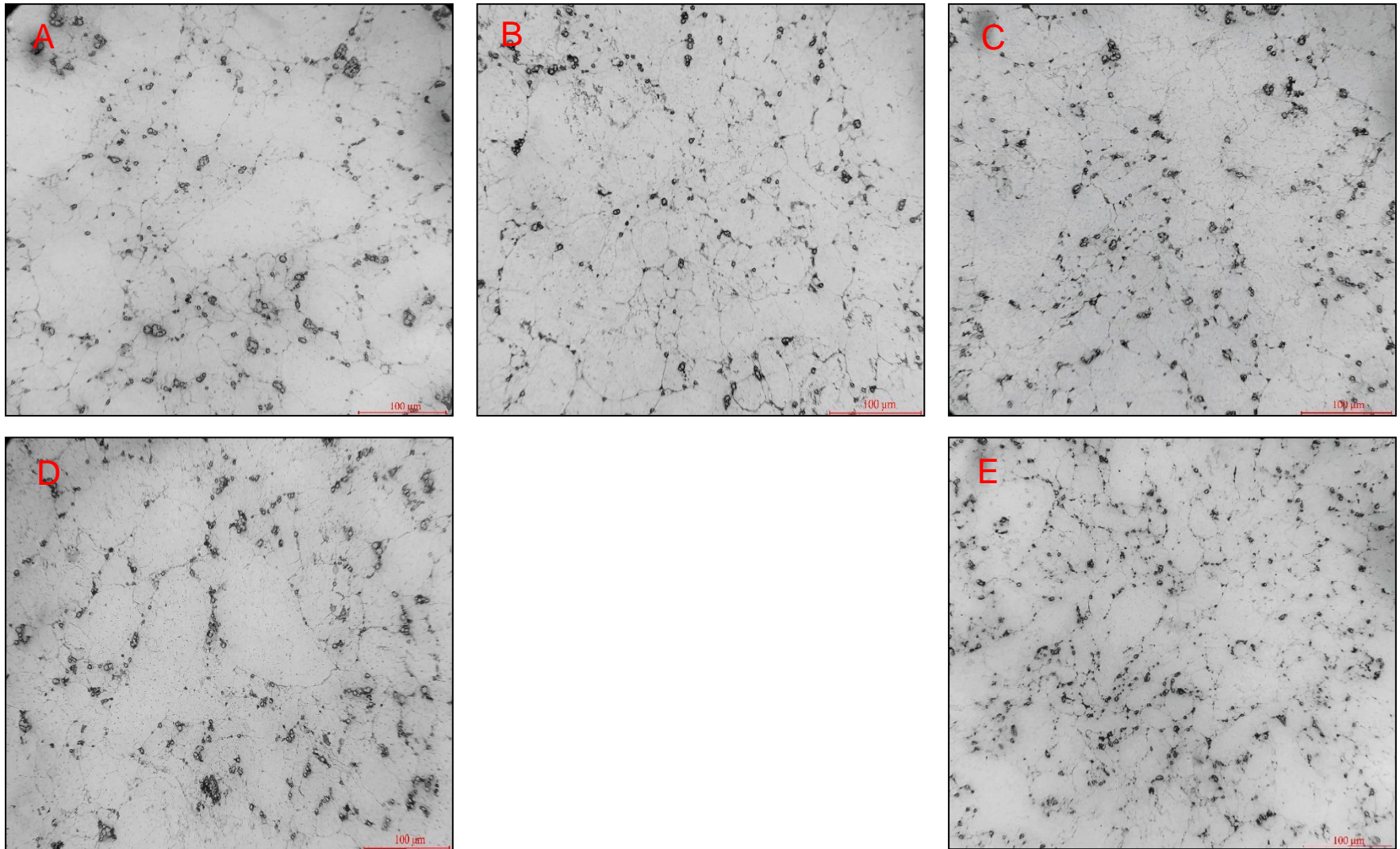


Figura 4.20 Microestructuras de los materiales compuestos Al6061/WC<sub>p</sub> a diferente porcentaje en peso de reforzamiento. Se presenta un corte longitudinal de las muestras obtenidas a 100x; a) 1% SiC, b) 2% SiC, c) 3% SiC, d) 4% SiC y e) 5% SiC

#### **4.4.1 Cuantificación y Distribución de Partículas en la Matriz.**

En ambas caras y con los dos refuerzos empleados, en los cuales hubo cambios significativos en la distribución de las partículas que afectan las propiedades mecánicas y tribológicas del material compuesto. Se determinó la dispersión de partículas de refuerzo cerámico (WC y SiC) en la matriz mediante la técnica del cuadrante. Mediante este método, se determinaron las variaciones en la dispersión de las partículas en el material compuesto como resultado del procesamiento, es decir, la reducción de aglomerados a agregados y/o partículas; para ello, primeramente, las muestras se dividieron en 64 áreas o cuadrantes. Se realizó una cuantificación del número de partículas en cada cuadrante empleando el software especializado Image Pro Plus.

A fin de generar un índice que muestre el grado de asimetría, los valores recabados se emplearon para determinar el grado de asimetría que presenta la distribución de las partículas en el material compuesto. Al generar patrones de 64 cuadrantes, se buscó una mayor efectividad en la determinación de la distribución. Esta medida estándar es utilizada de igual manera para determinar la fracción en función del área total. Una vez obtenido el índice, se analizó y se determinó la irregularidad en la distribución del refuerzo.

El método propuesto permitió estudiar el comportamiento de las partículas para representar si hay alto o bajo nivel de homogeneidad. Un valor cercano a 1, nos representa un bajo nivel de homogeneidad o mala distribución, mientras que una beta cercana a 0, nos indica lo contrario, un mejor nivel de distribución o mayor homogeneidad de las partículas reforzantes en la matriz. Al emplear un mayor número de cuadrantes se puede determinar la dispersión de las partículas. De forma indirecta se obtiene la distribución entre partículas ya que este parámetro, depende de la distancia entre estas.

En la tabla 4.5 se muestran los valores promedio de los valores de asimetría (betas) obtenidos por el método de dispersión en función de cortes laterales y transversales a las muestras. Para explicar de mejor manera, se presenta una gráfica de barras para determinar el comportamiento de las betas en función del porcentaje de refuerzo. Para obtener estas betas, en el anexo A.2 se muestra un ejemplo de cálculo<sup>46</sup>.

Tabla 4.5 Valores promedio de las distintas  $\beta$  para cortes longitudinales y transversales para el refuerzo de carburo de silicio.

Muestra	$\beta_{\text{longitudinales}}$	$\beta_{\text{transversales}}$
Al/6061-1%SiC	0.925	0.901
Al/6061-2%SiC	0.475	0.471
Al/6061-3%SiC	0.469	0.484
Al/6061-4%SiC	0.562	0.588
Al/6061-5%SiC	0.631	0.626

La figura 4.21 se muestra una gráfica de barras en función de  $\beta$ , es decir, el grado de asimetría para el material compuesto reforzado con carburo de silicio. Se puede observar que para el nivel más bajo de reforzamiento (Al/6061-1%SiC<sub>p</sub>) y en ambos cortes, el material presenta una mala distribución del refuerzo en la matriz ( $\beta \sim 0.9$ ). Se puede constatar a partir de las micrográficas que, las partículas solo se agrupan en un pequeño número de cuadrantes, mientras que muchos cuadrantes quedan vacíos lo que resulta en un sesgo distinto de cero. Entre más alta sea la asimetría, la dispersión es más pobre. Debido a la poca presencia de partículas y a la gran distancia entre estas, no se cubre el área total de la matriz lo que conlleva a una heterogeneidad tanto microestructural como en términos de propiedades, como se observa en las figuras 4.13 (a) y 4.15 (a).

La mayor parte de las partículas se distribuyen en la parte central de la matriz. Al aumentar el porcentaje de refuerzo (Al/6061-2%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-2%SiC<sub>p</sub>), se alcanzan los mejores valores de  $\beta$  en ambos cortes lo que implica, la reducción de aglomerados a agregados y/o partículas para estos niveles de reforzamiento; la tendencia es una distribución homogénea en el área total de las cuadrantes contabilizados. En la figura 4.13 (b), se puede observar a las partículas dispersas en toda el área analizada y solo hay pocas regiones con presencia de aglomerados. Por otro lado, en la figura 4.15 (b), las partículas se concentran en la parte central, mientras que en la esquina hay nula presencia de estas.

Al incrementar el porcentaje de refuerzo (Al/6061-4%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-5%SiC<sub>p</sub>),  $\beta$  aumenta nuevamente, pero sin alcanzar los valores obtenidos con el nivel más bajo de reforzamiento. Este comportamiento se observó en ambos cortes. Se puede advertir a partir de las figuras 4.13 (d) y 4.15 (e) que, aunque las partículas están distribuidas homogéneamente, en la parte superior del cuadrante, se han formado algunos aglomerados lo cual corrobora el incremento en la asimetría de la distribución del refuerzo. De igual forma, en el corte transversal, la asimetría también incrementa debido a la presencia de un mayor número de partículas aglomeradas. Esta distribución prevalece en la mayor parte de los cuadrantes

estudiados y si bien, contribuye a un arreglo uniforme del refuerzo en la matriz, se genera una reducción.

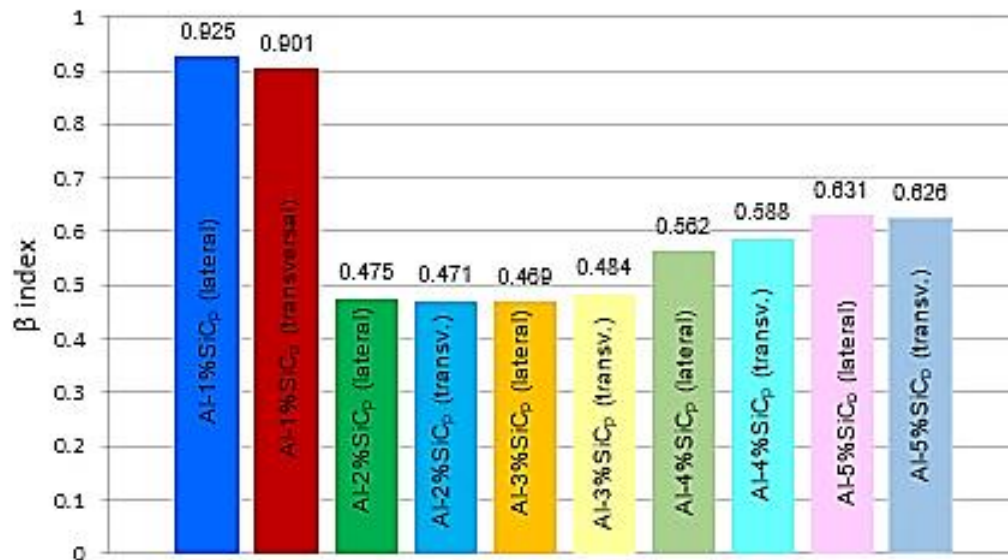


Figura 4.21 Gráfica de barras en función de  $\beta$  para el material compuesto reforzado con carburo de silicio.

En la tabla 4.6 se muestra las betas promedio obtenidas para el carburo de tungsteno donde el comportamiento obtenido es similar al presentado para el refuerzo de carburo de silicio.

Tabla 4.6 Valores promedio de las distintas  $\beta$  para cortes laterales y transversales para el refuerzo de carburo de tungsteno.

Muestra	$\beta_{laterales}$	$\beta_{transversales}$
Al/6061-1%WC	0.933	0.873
Al/6061-2%WC	0.467	0.462
Al/6061-3%WC	0.436	0.441
Al/6061-4%WC	0.500	0.513
Al/6061-5%WC	0.471	0.469

Los valores de beta para el nivel más bajo de reforzamiento Al/6061-1%WC<sub>p</sub> se muestra en la figura 4.17 son cercanos a la unidad además de ser los más altos tanto en corte transversal como en lateral; lo anterior nos indica que no se alcanzó la dispersión y distribución homogénea de las partículas con este porcentaje de refuerzo. La explicación a este comportamiento es la tendencia a formar aglomerados cuando menor es el tamaño de las partículas reforzantes<sup>73,74</sup>. Debido a que el WC es de un tamaño mucho menor que el SiC, la posibilidad de que las partículas de carburo de tungsteno formen aglomerados con mayor facilidad es mayor, lo que impedirá que se alcance una buena dispersión del refuerzo. Para

esta fracción de reforzamiento, podemos observar que las partículas si bien están separadas entre ellas, estas tienden a segregarse en la parte inferior del cuadrante como se muestra en la figura 4.17 (a), es decir, se logra una mediana dispersión de las partículas, pero no una adecuada distribución. El comportamiento descrito no se extiende a todos los cuadrantes analizados, el cuadrante analizado en la figura 4.19 (a) muestra una mejor distribución del refuerzo ya que este está presente en toda el área analizada<sup>73,74</sup>.

La mejor homogeneidad se alcanza con los niveles de reforzamiento del Al/6061-2%WC<sub>p</sub> y Al/6061-3%WC<sub>p</sub>. Las partículas están dispersas y distribuidas en toda el área analizada. En la figura 4.17 (b), las partículas comienzan a formar pequeños aglomerados en la parte inferior derecha del cuadrante, mientras que la figura 4.19 (b), se muestra que la distribución alcanzada es mejor. La disminución del valor de beta se puede observar en los casos analizados en las figuras 4.17 y 4.19 (c), donde las partículas no concentran en alguna región específica, sino que se distribuyen en toda el área contabilizada. Para los niveles de reforzamiento del Al/6061-4%WC<sub>p</sub> y Al/6061-5%WC<sub>p</sub> se presenta la misma tendencia observada con el carburo de silicio, el incremento en el valor de beta. La cantidad de aglomerados aumenta por lo que la distancia entre partículas disminuye<sup>73,74</sup>.

La figura 4.22 se muestra una gráfica de barras en función de  $\beta$ , para el material compuesto reforzado con carburo de tungsteno. Se puede observar que para el nivel más bajo de reforzamiento (Al/6061-1%WC<sub>p</sub>) en ambos cortes, el material presenta una mala distribución del refuerzo en la matriz que es superior a  $\beta \sim 0.9$ . En comparación con el SiC, las partículas solo se agrupan en un pequeño número de cuadrantes, además que muchos cuadrantes quedan vacíos lo que resulta en un sesgo distinto de cero. Similarmente, estos ocupan un gran número de partículas por lo que varía mucho en el conteo. Entre más alta sea la asimetría, la dispersión es más pobre. Debido a la poca presencia de partículas y a la gran distancia entre estas, no se cubre el área total de la matriz lo que conlleva a una heterogeneidad tanto microestructural como en términos de propiedades, como se muestra en las figuras 4.17 (a) y 4.19 (a) <sup>73,74</sup>.



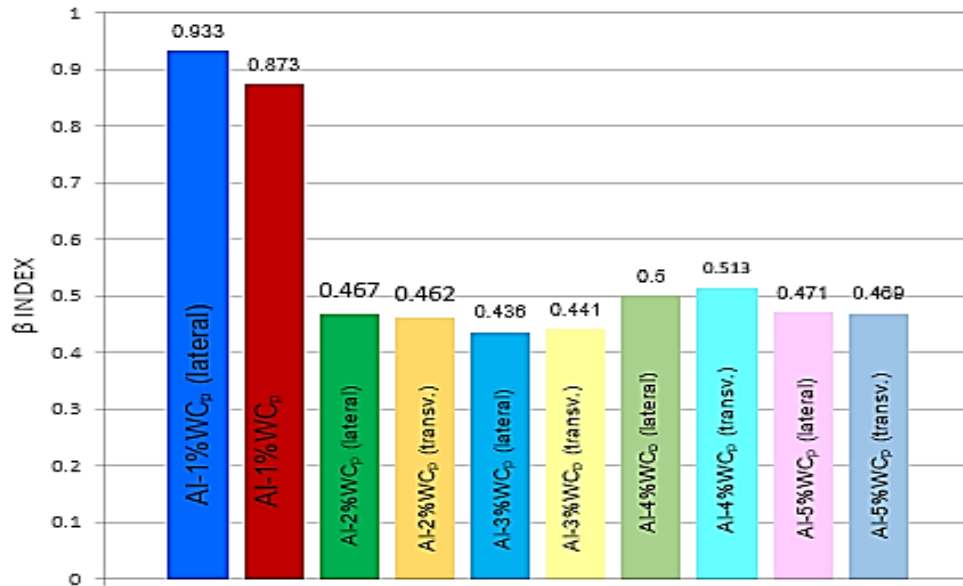


Figura 4.22 Gráfica de barras en función de  $\beta$  para el material compuesto reforzado con carburo de tungsteno.

Es importante señalar que la máxima homogeneidad del refuerzo en la matriz, es decir, el menor valor de beta promedio se alcanzó con un 3% de reforzamiento tanto el emplear carburo de silicio como carburo de tungsteno por lo que se espera alcanzar los valores más altos de resistencia a la tensión y resistencia al desgaste para este nivel de reforzamiento.

La figura 4.23 muestra la cantidad promedio de partículas por unidad de área observándose valores ascendentes en función del porcentaje de refuerzo. Al analizar longitudinalmente la dispersión y distribución del carburo de silicio se puede observar que el número de partículas por unidad de área es mayor respecto al corte transversal en cuatro de los cinco niveles estudiados lo que indicaría que en esta dirección, tanto la resistencia mecánica como al desgaste es mayor. En cuanto al carburo de tungsteno se observa un comportamiento distinto; en tres de los cinco niveles estudiados, no se aprecia una diferencia significativa en el número de partículas por unidad de área al analizar ambos cortes. Lo anterior se relaciona a una dispersión y distribución del refuerzo por lo que estos compuestos deberían ser los más homogéneos (Al/6061-2%WC<sub>p</sub>, Al/6061-3%WC<sub>p</sub> y Al/6061-5%WC<sub>p</sub>). En los otros dos niveles, el mayor número de partículas se presentó en el área transversal (a diferencia de lo observado con el carburo de silicio).

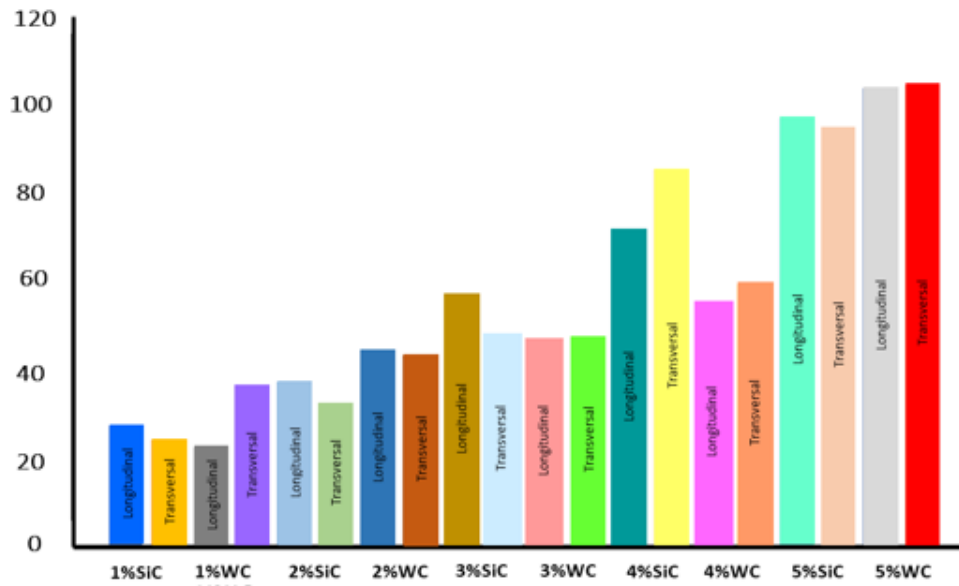


Figura 4.23 Gráfica de barras del promedio de partículas en el área total para los refuerzos cerámicos carburo de silicio y carburo de tungsteno en función de los distintos cortes.

#### 4.5 Ensayo de Desgaste.

Con el objetivo de analizar el comportamiento de los materiales fabricados y clasificarlos en términos de su resistencia al desgaste, así como para seleccionar aquel material con el mejor comportamiento tribológico, muestras de ambos sistemas de materiales compuestos fabricados, fueron sometidos a una triboprueba.

Para cumplir estos propósitos, se estudió la respuesta de estos materiales a un mecanismo de desgaste, es decir, a la exposición del material a una prueba modelo que simula el mecanismo bajo condiciones de carga. Debido a los costos y tiempos, las evaluaciones se realizaron en un equipo de prueba simplificado, donde ambas tribosuperficies se reemplazan por componentes simulados.

Todas las muestras de Al/6061-%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-%WC<sub>p</sub> obtenidas fueron sometidas a un ensayo de desgaste correspondiente a la norma ASTM G99. Las condiciones de la prueba de desgaste por deslizamiento en un rodillo se llevaron a cabo a una velocidad de 980 rpm aplicando una carga de 3.35 kg sobre la muestra en contacto con el rodillo durante un tiempo de prueba de 4 horas. La masa inicial de cada muestra se midió antes del ensayo y se realizó la correspondiente medición de pérdida de masa de la muestra cada 15 minutos durante todo el ensayo.

Un proceso de desgaste convencional (eliminación progresiva de material de una superficie en contacto deslizante o rodante contra una superficie contraria) pasa comúnmente por al menos tres etapas a medida que continua el deslizamiento como puede observarse en la figura 4.24.

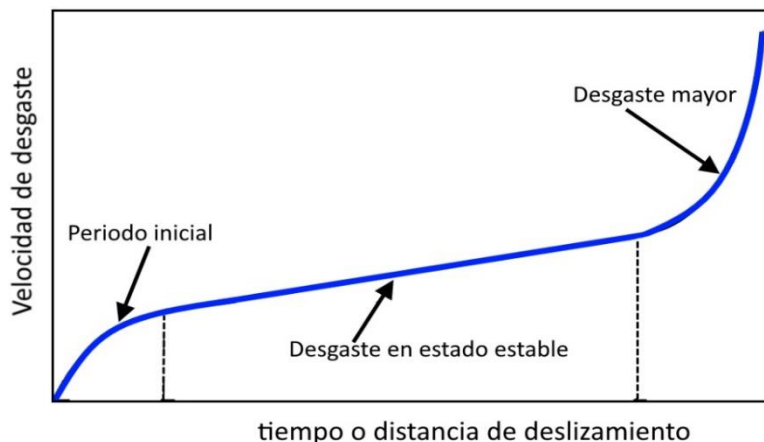


Figura 4.24. Comportamiento convencional de un material durante un ensayo de desgaste<sup>53</sup>.

Las figuras 4.25 y 4.26 muestran la velocidad de desgaste en función de la distancia recorrida durante un ensayo de desgaste para los materiales compuestos reforzados con distintos porcentajes de carburo de silicio y carburo de tungsteno, respectivamente. Todos los materiales presentan la etapa inicial o de rodaje durante la cual, las superficies de contacto se acoplan entre sí y la carga se distribuye más favorablemente sobre la superficie hasta alcanzar las condiciones de estado estacionario. Durante la etapa de rodaje, la tasa de desgaste puede ser alta como se muestra en la figura 4.25 para el caso del material compuesto Al-1%SiC<sub>p</sub> y en la figura 4.26 para los materiales reforzados con 1%, 2% y 5%WC<sub>p</sub>; el tiempo correspondiente al acoplamiento se mantiene durante un lapso breve en comparación con la vida útil completa del componente.

Pasando la etapa de rodaje, se alcanzan las condiciones de estado estable donde la tasa de desgaste disminuye y es la etapa que prevalece durante la mayor parte de la vida útil del sistema. Si bien, durante esta etapa la pérdida de material es baja, es durante esta etapa que eventualmente se alterarán las holguras o las propiedades de la superficie en la medida en que los componentes fallen.

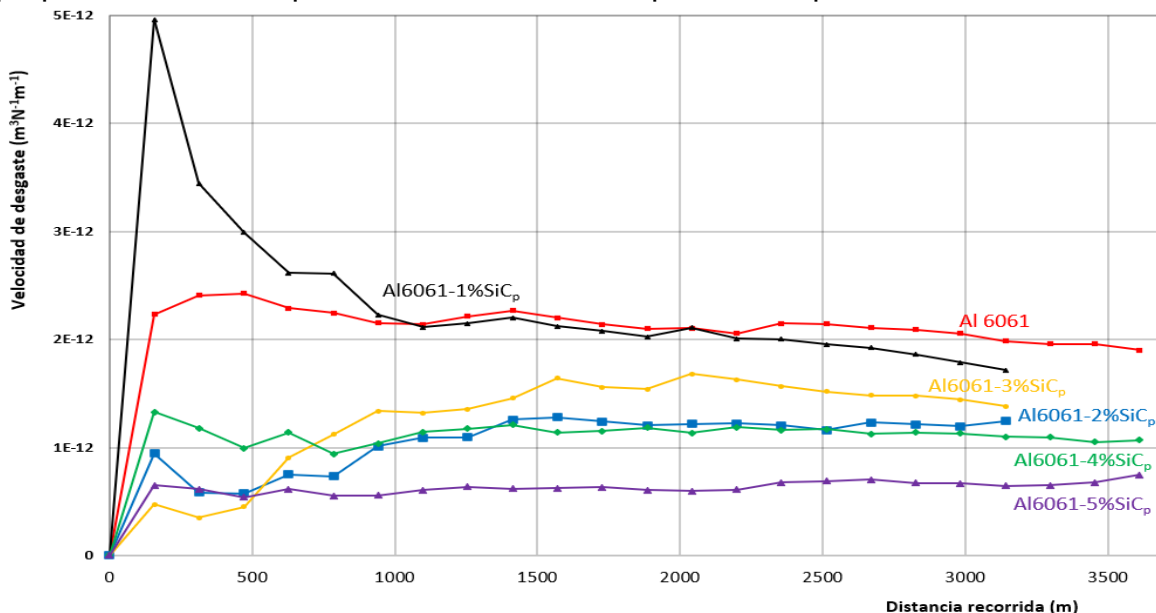


Figura 4.25. Velocidad de desgaste en función de la distancia recorrida para las muestras de Al6061/%SiC<sub>p</sub>

En el período final, la etapa catastrófica, las tasas de desgaste son altas y se produce un daño superficial severo. De forma general, los materiales estudiados no alcanzaron esta tercera etapa a excepción del reforzado con 5%SiC<sub>p</sub> en el que si se comienza a apreciar esta tercera etapa. En cuanto a la distancia recorrida, todos los materiales alcanzaron una distancia superior a los 3000 m bajo condiciones de carga.

Analizando el sistema Al 6061-SiC<sub>p</sub> se observa que solo el material reforzado con 1% SiC<sub>p</sub> presenta una tasa de desgaste mayor que la del material monolítico durante la primera etapa del ensayo. Este comportamiento, en general se debe a que, en la mayoría de las superficies en contacto relativo de deslizamiento o rodadura, el área de contacto real es mucho más pequeña que el área de contacto nominal. La carga aplicada es transportada por una serie de pequeñas asperezas locales que conforman el área de contacto real, y el comportamiento de desgaste resulta de las interacciones entre estas asperezas de contacto local. En las regiones de estos contactos locales, esfuerzos normales y de corte son característicos de las condiciones que presenta el material. A menudo y muy por encima del límite elástico de los materiales, también son evidentes un incremento local de la temperatura, un alto grado de deformación, así como una elevada tasa de corte<sup>81</sup>.

El resto de los materiales compuestos no presentan un excesivo desgaste durante la etapa inicial, aunque alcanzan el estado estable en distancias similares (en todos los casos, después de los 1000 m recorridos). El material compuesto con una menor tasa de desgaste es el reforzado con 5% SiC<sub>p</sub> seguido de los reforzados con 4% y 2% SiC<sub>p</sub>. Las dos etapas descritas pueden analizarse y justificarse con base en la distribución del refuerzo en la matriz. Como ya se mencionó, la distribución más deficiente del refuerzo se presentó en el nivel más bajo de reforzamiento (Al/6061-1%SiC<sub>p</sub>) y en ambos cortes. Debido a la poca o nula presencia de refuerzos la muestra presenta una tasa de desgaste muy similar a la del material monolítico la cual se intensifica cuando no se ha alcanzado un acoplamiento inicial.

Con niveles de reforzamiento del Al/6061-2%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-3%SiC<sub>p</sub> se reduce la distancia que comprende la etapa inicial del ensayo lo que concuerda con la reducción del valor de  $\beta$ . Al reducirse la cantidad de aglomerados y alcanzarse una mejor dispersión del refuerzo, la distribución homogénea de las partículas permite que la carga aplicada se transfiera al refuerzo. Sin embargo, los valores más elevados de resistencia al desgaste se alcanzan al incrementar el porcentaje de refuerzo; lo anterior puede observarse en la etapa estacionaria para los niveles con Al/6061-4%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-5%SiC<sub>p</sub> en la figura 4.26. Si bien el valor de  $\beta$  aumenta nuevamente con estos niveles de reforzamiento (lo que conlleva a la formación de aglomerados en mayor cantidad que en los niveles previos reflejado en la etapa inicial del ensayo), las partículas aún mantienen una dispersión aceptable, aunque con una distancia menor entre estas. Esta última afirmación refleja una distribución aceptable, aunque una no tan buena dispersión de las partículas ya que se pueden encontrar zonas libres de refuerzo.

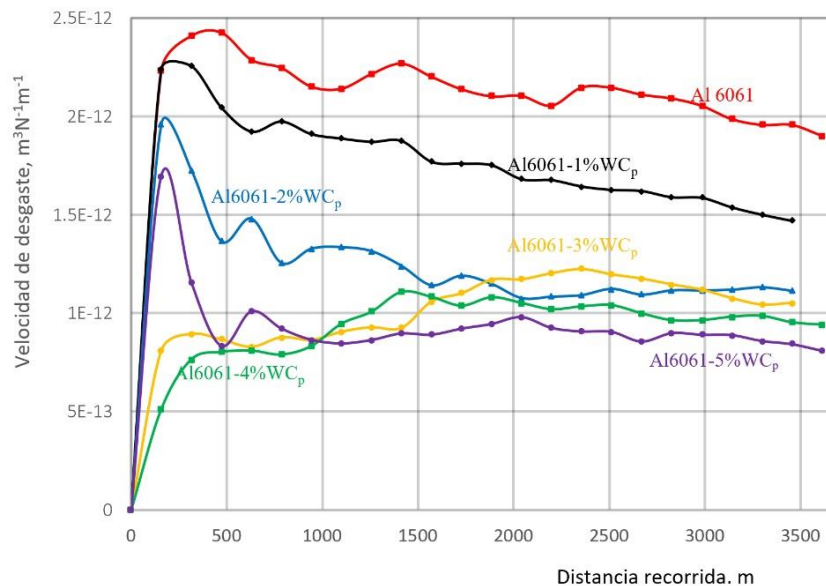


Figura 4.26. Velocidad de desgaste en función de la distancia recorrida para las muestras de Al6061/%WC<sub>p</sub>

En el caso de los materiales reforzados con carburo de tungsteno, el comportamiento es similar al ya descrito previamente. La tasa de desgaste para estos materiales compuestos fue menor a la del material monolítico para todos los niveles de reforzamiento. Para Al/6061-1%WC<sub>p</sub>, la velocidad de desgaste disminuye en función de la distancia recorrida por lo que el estado estacionario no es del todo claro. La tasa de desgaste alcanzada con este reforzamiento se relaciona al valor de beta cercano a la unidad lo que a su vez se corresponde al bajo nivel de reforzamiento, pero también a la incorrecta dispersión de las partículas. La etapa inicial para los niveles de reforzamiento del Al/6061-2%WC<sub>p</sub> y Al/6061-5%WC<sub>p</sub> es semejante entre ellas; se puede apreciar una elevada velocidad de desgaste al inicio del ensayo, aunque no se prolonga por arriba de los 1000 m de distancia recorrida. Una vez recorrida esta distancia, es evidente el estado estacionario. El comportamiento observado en los materiales compuestos reforzados con Al/6061-3%WC<sub>p</sub> y Al/6061-4%WC<sub>p</sub> no muestran una etapa inicial de pérdida de material muy abrupta (indicio de un valor de beta menor, es decir, un material más homogéneo) y tienden a un comportamiento asintótico después de los 500 m recorridos. En términos de distribución del refuerzo, el nivel de 3% presenta una mejor distribución, aunque con un Al/6061-4%WC<sub>p</sub>, la tasa de desgaste es menor.

Conforme se incrementa el tiempo del ensayo o se alcanzan mayores distancias recorridas, se establece la eliminación continua de material de las superficies de acoplamiento y a la vez, también aumenta la fuerza de fricción que se opone al

deslizamiento. La tasa de desgaste alcanzada durante las condiciones estables permite caracterizar las propiedades del material compuesto a largo plazo. A partir de los resultados observados se aprecia que los materiales que alcanzaron la mayor resistencia al desgaste después de la etapa inicial, son los reforzados con el nivel más alto de cada carburo (Al/6061-5%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-5%WC<sub>p</sub>).

Debido a que solo los materiales compuestos reforzados con Al/6061-1%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-2%SiC<sub>p</sub> presentaron desgaste continuo y no alcanzaron la falla, solo es relevante en estos dos casos, analizar los daños superficiales y su repercusión sobre el rendimiento general del material con el fin de predecir el inicio del régimen de desgaste severo ya que esta etapa, como ya se mencionó, no se alcanzó en los materiales compuestos.

En el resto de los materiales, el ensayo de desgaste se detuvo debido a que el estado de falla fue alcanzado. El análisis de las muestras falladas no da indicio del motivo de fallo del material, es decir, si se debe a un desgaste continuo o de un daño repentino por lo que sería necesario indagar mediante más pruebas, sobre el mecanismo que causó el desgaste durante la prueba, ya que estos pueden estar ocultos por el daño que ocurrió durante la fase final de la falla. Al revisar los componentes que no fallaron (Al/6061-1%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-2%SiC<sub>p</sub>) se puede apreciar una superficie gastada en ambos casos. Esto ayuda a diferenciar entre las características de la superficie que aparecieron durante la fabricación y las causadas por las condiciones del servicio.

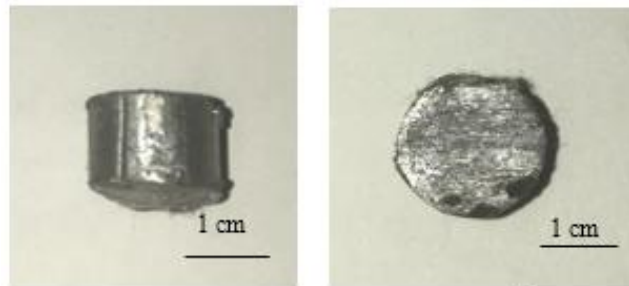


Figura 4.27. Probetas obtenidas del ensayo de desgaste para los Al/6061-1%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-2%SiC<sub>p</sub>.

Al analizar la superficie desgastada en sección transversal y longitudinal de la muestra con Al/6061-2%SiC<sub>p</sub> se puede observar la profundidad del daño, principalmente la falta de material en algunas zonas (huecos o desprendimiento de material) o capas transferidas de material. El desprendimiento, fractura y sobrecalentamiento local repentino causa deformación plástica y conduce a la pérdida de material y a un acabado superficial inaceptable como puede observarse en la figura 4.27. Si el trabajo de adhesión no es bueno, la matriz no se

fortalece y se crean defectos en la superficie del material, además, la matriz se fragmenta y se incrementa la pérdida de material. Si la adhesión es adecuada, la carga se transfiere al refuerzo y la pérdida disminuye.

El tamaño de partícula y el porcentaje de refuerzo son los principales factores para obtener una menor pérdida de material y una alta resistencia al desgaste. Para compuestos con partículas pequeñas se espera alcanzar una mejora en la resistencia al desgaste. Conforme se incrementa el tamaño del refuerzo, la pérdida de material es mayor. La velocidad de desgaste específico está en función del volumen perdido por la distancia recorrida. El comportamiento de los materiales compuestos para un nivel fijo de reforzamiento, pero variando el tipo de refuerzo se muestra en la figura 4.28.

En la figura 4.28 A se muestra la tasa de desgaste de los materiales compuestos reforzados de Al/6061-1%SiC<sub>p</sub>. y Al/6061-1%W<sub>i</sub>C<sub>p</sub>. Con este porcentaje de reforzamiento, se obtuvo una menor pérdida de material con el carburo de tungsteno, la etapa de rodamiento es mínima y el desgaste del material es menor a la presentada por el material monolítico a cualquier tiempo. En los niveles de reforzamiento restantes, ambos materiales compuestos presentaron menor velocidad de desgaste en comparación con el material sin reforzar. Se puede observar que conforme aumenta el nivel de reforzamiento, la pérdida de material cae por lo que la velocidad de desgaste disminuye con ambos materiales obteniéndose menores pérdidas (en tres de los cinco porcentajes trabajados) al reforzar con partículas de carburo de tungsteno.



## Capítulo 4. Resultados y Análisis de Resultados

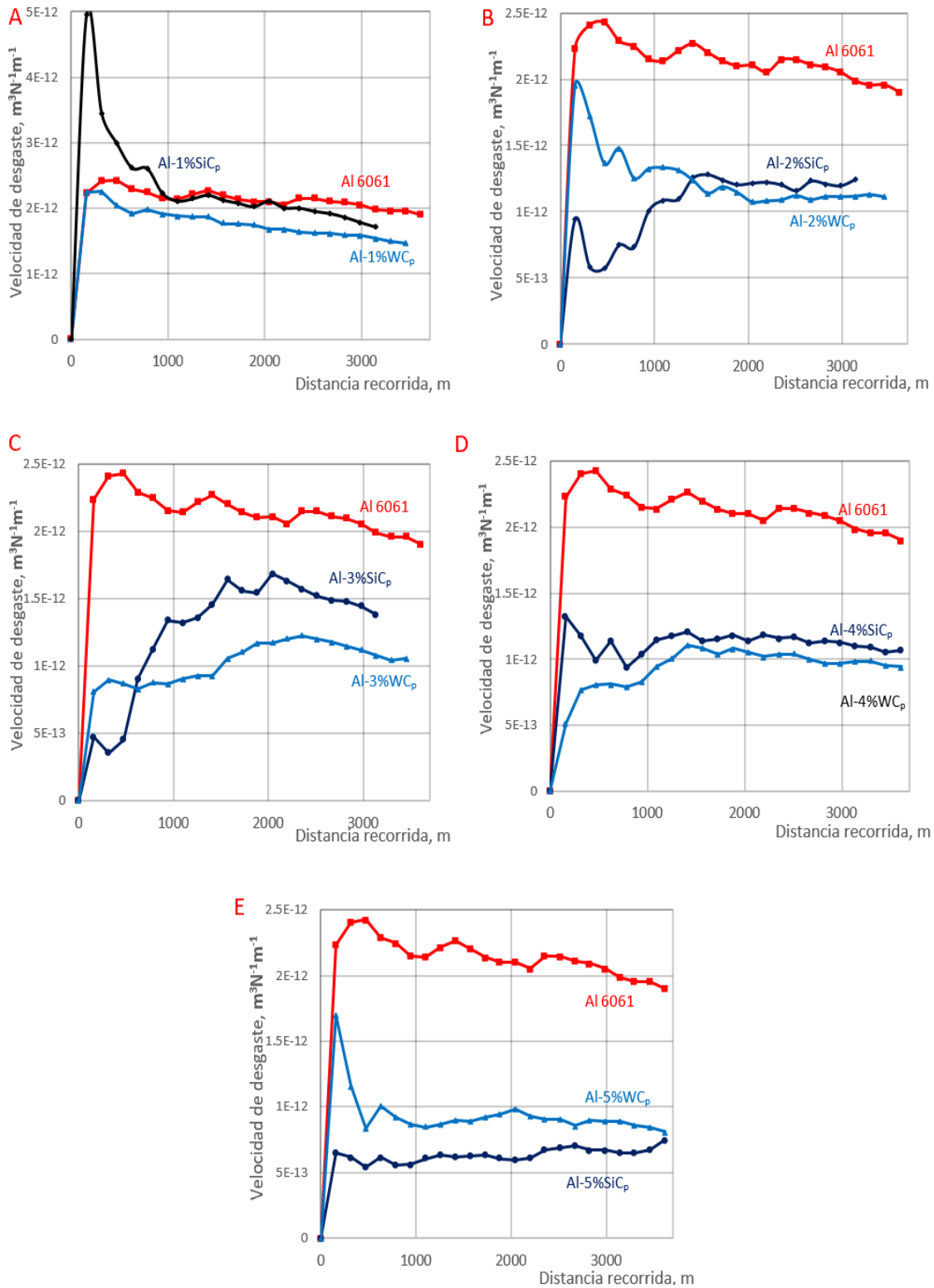


Figura 4.28 Velocidad de desgaste en función de la distancia recorrida en materiales compuestos reforzados con distintos porcentajes de partículas cerámicas de SiC y WC; A) 1%, B) 2%, C) 3%, D) 4% y E)5%.

Para los materiales compuestos reforzados en un Al/6061-2% $W_iC_p$ , se presenta una pérdida inicial mayor. Al comparar los valores de beta, no hay diferencia significativa por lo que la distribución del refuerzo, no varía considerablemente en ambos materiales compuestos. Una vez alcanzada la estabilidad, el composito reforzado con Al/6061-% $SiC_p$  presenta una tasa de desgaste menor.

Al aumentar la fracción de refuerzo a 3% y 4%, la tendencia señala una reducción en la pérdida de masa para ambos refuerzos cerámicos, aunque menor para el carburo de tungsteno. Con estos niveles de refuerzo, la etapa inicial no muestra una considerable pérdida de material de material compuesto. A partir de una fracción con 5% de refuerzo, el comportamiento es distinto, debido a que el carburo de silicio empieza a presentar una mejor respuesta a la pérdida de material en comparación con el carburo de tungsteno, en otras palabras, su velocidad de desgaste específica es menor.

La tendencia a formar aglomerados conforme se disminuye el tamaño de partícula puede explicar este comportamiento<sup>89,90</sup>. Debido a que las partículas de WC son menor tamaño que las de SiC, la posibilidad de que las partículas de carburo de tungsteno formen aglomerados es mayor, lo que limitará la obtención de una buena dispersión del refuerzo. Para esta fracción de reforzamiento, podemos observar que las partículas si bien están separadas entre ellas, estas tienden a segregarse en la parte inferior del cuadrante como se muestra en la figura 4.17 (a), es decir, se logra una mediana dispersión de las partículas, pero no una adecuada distribución. El comportamiento descrito no se extiende a todos los cuadrantes analizados, el cuadrante analizado en la figura 4.19 (a) muestra una mejor distribución del refuerzo debido a que este está presente en toda el área analizada<sup>89,90</sup>.

Un punto adicional a considerar es el siguiente. La selección del material compuesto con mayor resistencia al desgaste estará determinada no solo por la menor tasa de desgaste sino también por términos económicos. Se puede deducir que el carburo de silicio mejora su respuesta al desgaste a medida que incrementa la fracción reforzante. Esto aunado al factor económico, permite su selección preferencial aun a pesar de que investigaciones<sup>83,84</sup> señalan al carburo de tungsteno como mejor material reforzante dejando de lado que si bien este último presenta mayor respuesta en términos de desgaste (a bajos porcentajes de reforzamiento), la presencia de aglomerados y de porosidad incrementan al aumentar el porcentaje de reforzamiento<sup>73,77</sup>.

#### 4.6 Ensayo de Compresión.

El ensayo de compresión tuvo como objetivo determinar la carga de compresión máxima que los materiales compuestos pudieron soportar sin fracturarse además de determinar el límite elástico y resistencia a la compresión bajo ensayo.

La figura 4.29 muestra las curvas  $\sigma$  vs.  $\delta$  bajo un ensayo de compresión para los materiales compuestos fabricados. La resistencia a la compresión para la aleación 6061 es similar para todas las temperaturas y tiempos de sinterización y mejora gradualmente en función del tiempo cuando se fija la temperatura de sinterización en 500°C, como se observa en la tabla 4.7. Para una temperatura de trabajo de 500° C y conforme el tiempo de sinterización aumenta, el módulo de Young, así como el módulo específico incrementan. Al aumentar la temperatura a 550°C se observa una tendencia similar, aunque los valores alcanzados son menores. Las condiciones con las que se alcanza el mayor valor del módulo de Young y del módulo específico son 500°C y 150 minutos.

Tabla 4.7 Valores obtenidos de la muestra de sinterización del módulo de Young fabricado (GPa) y modulo específico de la aleación monolítica 6061

Muestra/ condiciones	Módulo de Young fabricado (GPa)	Modulo específico E/ $\rho$
Al-6061/ 500°C, 90 min.	3.078	1.14x10 <sup>6</sup>
Al-6061/ 500°C, 120 min.	3.101	1.148x10 <sup>6</sup>
Al-6061/ 500°C, 150 min.	3.257	1.206x10 <sup>6</sup>
Al-6061/ 550°C, 90 min.	2.781	1.03x10 <sup>6</sup>
Al-6061/ 550°C, 120 min.	2.818	1.043x10 <sup>6</sup>
Al-6061/ 550°C, 150 min.	3.157	1.169x10 <sup>6</sup>

El aumento en la resistencia a la compresión está en función del aumento en el contenido de carburo en la matriz al conferirle una dureza mayor respecto al monolítico o a niveles bajos de reforzamiento. Un aumento en el contenido de SiC y WC tiene un efecto respecto a los valores de resistencia a la compresión, en teoría al ser más pequeñas las partículas de carburo de tungsteno la resistencia a la compresión es mayor por lo que se obtendrá mejores módulos de Young y un UTS alto para determinar el comportamiento en la zona elástica.

En la figura 4.29 (b) has, se muestra las curvas  $\sigma$  vs.  $\delta$  de los materiales compuestos bajo estudio en función de la fracción de refuerzo agregado. Para Al/6061-2%WC<sub>p</sub> y Al/6061-5%WC<sub>p</sub> y Al/6061-2%SiC<sub>p</sub> y Al/6061-3%SiC<sub>p</sub>, tanto el valor del módulo de Young como el módulo específico disminuyen como se muestra en la figura 4.29 (c) y (f).

Al analizar los materiales con 1% de reforzamiento, el valor más alto del módulo de elasticidad lo presentó el composito reforzado con carburo de tungsteno. La gráfica mostrada en la figura 4.28 (b) permite observar que para alcanzar una deformación de 0.15 mm/mm, el composito reforzado con carburo de silicio necesita de un esfuerzo de 260 MPa aproximadamente, el material monolítico alrededor de 320 MPa mientras que el composito con carburo de tungsteno precisa de alrededor de 380 MPa; este último valor representa un 25% más de rigidez lo cual a su vez indica que este material se deformará menos o requerirá una mayor carga para deformarse de forma elástica. Este comportamiento está más relacionado con el tamaño del refuerzo que con su distribución ya que ambos materiales presentaron valores de beta cercanos a la unidad. Un comportamiento semejante y valores muy parecidos se obtuvieron con los materiales compuestos con un 3% de reforzamiento.

Tabla 4.8 Valores obtenidos de los materiales compuestos Al/6061-%WC<sub>p</sub>, módulo de Young (GPa) y módulo específico.

Muestra	Módulo de Young (GPa)	Modulo específico E/ρ
Al-6061	3.257	1.181x10 <sup>6</sup>
Al-1%WC	5.120	1.889x10 <sup>6</sup>
Al-2%WC	2.682	0.906x10 <sup>6</sup>
Al-3%WC	3.432	1.201x10 <sup>6</sup>
Al-4%WC	3.798	1.180x10 <sup>6</sup>
Al-5%WC	2.123	0.634x10 <sup>6</sup>

Para un 2% de reforzamiento, el composito reforzado con WC requiere aproximadamente de 260 MPa de esfuerzo, el composito con SiC precisa de alrededor de 305 MPa mientras que el material monolítico alrededor de 320 MPa para alcanzar una deformación del 0.15 mm/mm. Un comportamiento semejante y valores muy parecidos de esfuerzo y deformación, se obtuvieron con los materiales compuestos con un 5% de reforzamiento.

Una disminución en la resistencia a la compresión para los refuerzos para 2 y 3% como se muestra en las figuras 4.29 (c) y (d) se relaciona nuevamente con el fenómeno de mala distribución, que hace que el material monolítico soporte la carga compresiva y no el refuerzo cerámico. La resistencia a la compresión más elevada la presentó el composito con un Al/6061-4%WC<sub>p</sub>. Con este nivel de reforzamiento, el composito Al/6061-4%WC<sub>p</sub> requirió de más de 400 MPa para deformarse 0.15 mm/mm mientras que el composito Al/6061-4%SiC<sub>p</sub> solamente de 245 MPa.

El comportamiento de las curvas de compresión de los refuerzos es similar o no tienen un mejor comportamiento que el material monolítico y se explica que durante el ensayo de compresión, las muestras pueden presentar una inestabilidad lateral debido a que no están sujetas las piezas y son causadas por una expansión lateral por lo que presentan una forma de abarrilamiento de la probeta debido a una alta ductilidad. Se debe mencionar el papel de una buena interfase debido a que, si el compuesto presenta discontinuidades, la rigidez obtenida será la de los componentes individuales y no la del material compuesto, recayendo este valor en la rigidez de la matriz. El comportamiento de la matriz como el refuerzo en compresión en cada fase es proporcional al módulo de Young, donde el esfuerzo es transferido al refuerzo a través de las interfases. Idealmente el aumento del módulo de Young está en función del contenido de refuerzo. La capacidad de la carga de las partículas es alta en comparación con el material monolítico y tiende a reducir la carga soportando el refuerzo.

La mayoría de las probetas fallan debido a que las partículas cerámicas funcionan como un colchón. Al aplicar una fuerza, se desarrolla un plano diagonal, donde el esfuerzo cortante está a 45° de la dirección de la carga de compresión, por lo que la existencia de porosidad, defectos o aglomerados en la matriz, el material no tendrá un rendimiento de lo esperado. La funcionalidad de las partículas cerámicas es en absorber esa energía y distribuirla por toda la matriz.

Tabla 4.9 Valores obtenidos de los materiales compuestos Al/6061-%SiC<sub>p</sub>, módulo de Young (GPa) y módulo específico.

Muestra	Módulo de Young (GPa)	Modulo específico E/ρ
Al-6061	3.257	1.206x10 <sup>6</sup>
Al-1%SiC	3.453	1.276x10 <sup>6</sup>
Al-2%SiC	2.884	1.064x10 <sup>6</sup>
Al-3%SiC	2.733	1.006x10 <sup>6</sup>
Al-4%SiC	3.753	1.379x10 <sup>6</sup>
Al-5%SiC	3.812	1.398x10 <sup>6</sup>

Las partículas de carburo de tungsteno al ser de menor tamaño respecto a las de carburo de silicio estas fueron segregadas a las zonas de alta energía como los defectos, por lo que el comportamiento no fue bueno, de igual forma la presencia de aglomerados hace que el material no presenta una homogenización a los esfuerzos de compresión aplicados por lo que las curvas varían respectivamente.

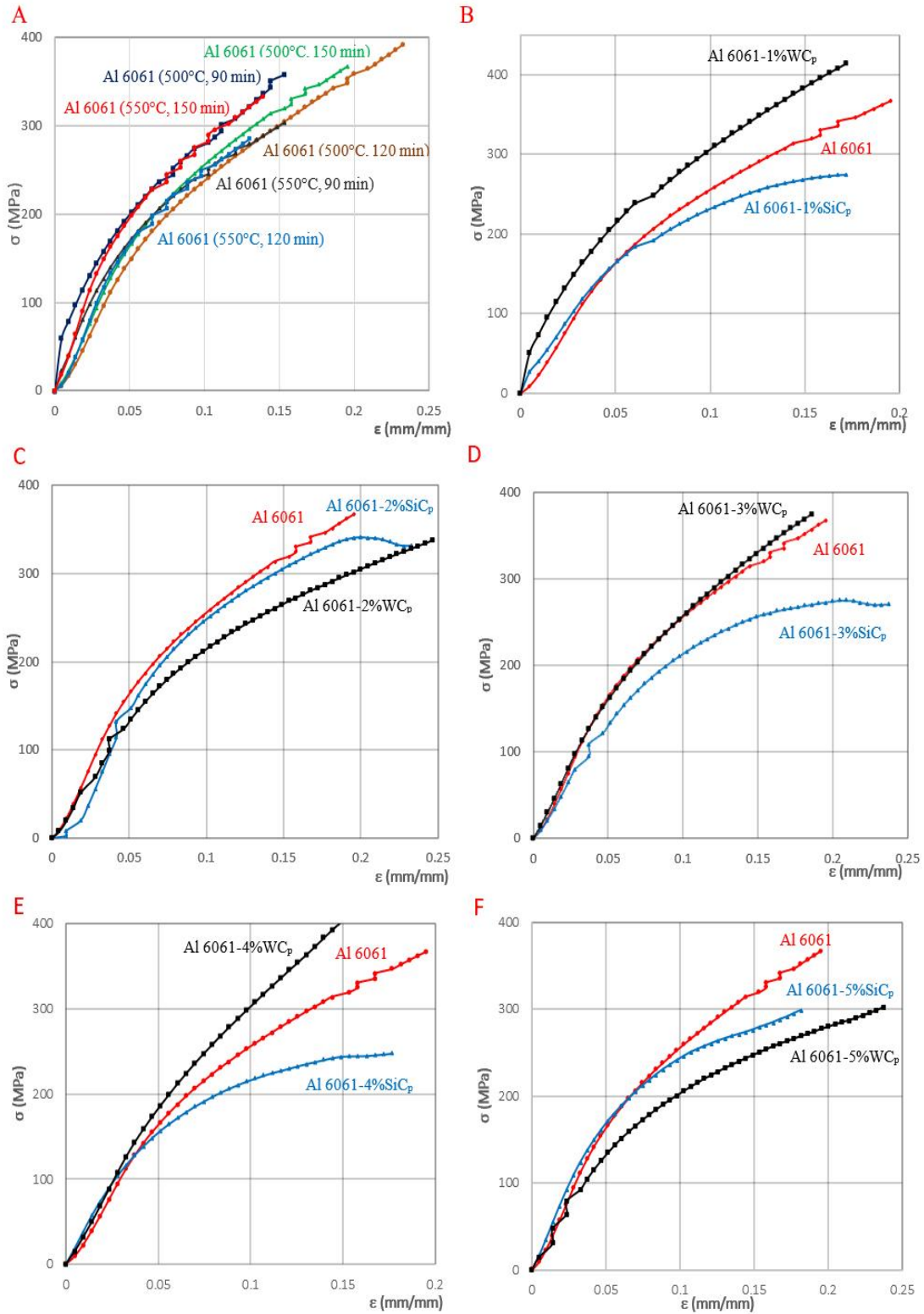


Figura 4.29. Curvas esfuerzo-deformación del ensayo de compresión para el material compuesto Al-6061 con los distintos refuerzos cerámicos SiC y WC con sus respectivas fracciones en peso (A; Al-6061, B; 1%, C:2%, D:3%, E:4% y F:5%).

## Capítulo 5

### Conclusiones.

En este trabajo se presenta el comportamiento y estudio del carburo de silicio y carburo de tungsteno en forma de partícula para la fabricación de un material compuesto base aluminio 6061 por la vía de metalurgia de polvos y se concluye lo siguiente.

- Los polvos de aluminio 6061 obtenidos por atomización con aire presentan una morfología irregular con un tamaño promedio de 27  $\mu\text{m}$ .
- Las partículas de carburo de silicio presentan una morfología redondeada con forma irregular y puntiaguda con un tamaño promedio de 33  $\mu\text{m}$ . La presencia de impurezas en la superficie de las partículas de SiC afectan en la unión de los polvos de aluminio y las partículas en el proceso de sinterización haciendo que las propiedades mecánicas del material disminuyan.
- Las partículas de carburo de tungsteno presentan una morfología semiesférica con un tamaño promedio de 4  $\mu\text{m}$ . Al tener un tamaño inferior a los polvos de aluminio 6061, las partículas de WC se localizaron en el límite de grano.
- Los parámetros de operación para fabricar los materiales compuestos fueron:
  - Tiempo de mezclado 150 minutos.
  - Compactación 17 MPa
  - Sinterización 500°C y 150 minutos
 Al utilizar los parámetros anteriores se obtiene un material con menor grado de porosidad y además de que se tienen granos con tamaño homogéneo, el proceso se llevó a cabo en ausencia de una atmósfera inerte.
- Para el material compuesto de Al/6061-%SiC<sub>p</sub>, las partículas de silicio al tener un tamaño de partícula grande provocan que actúen como barrera y disminuye el crecimiento de grano de Al/6061. Mientras que las partículas de carburo de tungsteno al tener un menor tamaño de partícula, permite que los granos de Al/6061 crezcan y queden segregadas en los límites de grano.
- Los porcentajes de refuerzos de ambos materiales compuestos que presentan una mejor homogeneidad en corte longitudinal y vertical son 2% y 3% debido a que presentan una mejor distribución de partículas en la matriz.
- A mayor porcentaje de refuerzo de Al/6061-%SiC<sub>p</sub> presenta la una superior repuesta a la resistencia al desgaste mientras que a menor porcentaje de refuerzo de Al/6061-%WC<sub>p</sub>, presenta menor resistencia al desgaste. Sin embargo, la presencia de aglomerados de partículas, porosidad y tamaño de partícula afectan la resistencia al desgaste.

- El Al/6061/1%WC<sub>p</sub> tiene el valor más alto del módulo de elasticidad al tener un tamaño de partícula pequeño se deformará menos y se segregará a las zonas de alta energía y requerirá una mayor carga para deformar elásticamente. Sin embargo, las muestras de el Al/6061-4%SiC<sub>p</sub>, y Al/6061-5%SiC<sub>p</sub> presentan una mejor resistencia a la compresión que las que tienen menor porcentaje de refuerzo.
- Las propiedades de un material en las áreas de contacto reales pueden estar lejos de las medidas mediante los procedimientos de prueba mecánicas. El acoplamiento entre las propiedades de desgaste y las propiedades mecánicas, como el módulo elástico y el módulo específico, es débil.



## Anexos

### Anexo A. 1. Cálculo de los distintos porcentajes de refuerzo.

Para obtener muestras con una altura de  $7.273 \text{ cm}^3$ , para utilizar la matriz se realizaron los siguientes cálculos.

- Regla de las mezclas.

$$\rho_{mezcla} = \rho_{Al6061} * (\%Al6061) + \rho_{refuerzo} * (\%refuerzo)$$

$$\rho_{Al-1\%SiC} = \left[ 2.70 \frac{gr_{Al6061}}{cm^3} * (0.99) \right] + \left[ 3.21 \frac{gr_{SiC}}{cm^3} * (0.01) \right] = 2.705 \frac{gr}{cm^3}$$

$$\rho_{Al-1\%WC} = \left[ 2.70 \frac{gr_{Al6061}}{cm^3} * (0.99) \right] + \left[ 15.63 \frac{gr_{WC}}{cm^3} * (0.01) \right] = 2.829 \frac{gr}{cm^3}$$

El volumen fue determinado con la siguiente ecuación.

$$V = Axh$$

$$V = 2.74 \text{ cm}^2 \times 2.1 \text{ cm} = 5.754 \text{ cm}^3$$

Para determinar la masa ocupada se parte de la densidad obtenida y el volumen conocido.

$$\rho_{mezcla} = \frac{m_{mezcla}}{V_{mezcla}}$$

$$m_{mezcla} = \rho_{mezcla} * V_{mezcla}$$

$$m_{Al-1\%SiC} = \left( 2.705 \frac{gr}{cm^3} \times 5.754 \text{ cm}^3 \right) = 15.565 \text{ gr}$$

Para conocer la cantidad de aluminio y carburo de silicio se sigue lo siguiente.

$$15.565 \times \frac{99\%}{100\%} = 15.404 \text{ gr}_{Al6061}$$

$$15.565 \times \frac{1\%}{100\%} = 0.155 \text{ gr}_{SiC}$$

Para reafirmar lo anterior se ocupa la siguiente formula.

$$V_{comp} = \%Al \left( \frac{m_{Al}}{\rho_{Al}} \right) + \%refuerzo \left( \frac{m_{refuerzo}}{\rho_{refuerzo}} \right)$$

$$V_{comp} = \left[ 0.99 \times \left( \frac{15.565 \text{ gr}_{Al}}{2.70 \left( \frac{gr}{cm^3} \right)} \right) \right] + \left[ 0.01 \times \left( \frac{0.155 \text{ gr}_{SiC}}{3.21 \left( \frac{gr}{cm^3} \right)} \right) \right] = 5.75 \text{ cm}^3$$

Datos:

$$\rho_{SiC} = 3.21 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{WC} = 15.63 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{Al} = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

### Anexo A.2. Cálculo para obtener la $\beta_{promedio}$ mediante el método de análisis de homogeneidad.

En la tabla A.1, se muestran los cuadrantes con el número de partículas totales, para el material compuesto Al/6061-1%SiC<sub>p</sub>.

Tabla A.1 Número total de partículas para Al/6061-1%SiC<sub>p</sub>.

Cuadrante	Partículas
1	19
2	30
3	20
4	30

Mediante la siguiente ecuación se obtiene el promedio de las partículas entre el número total de cuadrantes ocupados.

$$\bar{X} = \frac{(\overline{X_{h1}} + \overline{X_{h2}} + \dots + \overline{X_{hN}}) + (\overline{X_{v1}} + \overline{X_{v2}} + \dots + \overline{X_{hN}})}{2N}$$

$$\bar{X} = \frac{22.5}{2(32)} = 3.093$$

Posteriormente se obtiene la varianza de cada cuadrante para encontrar el total.

$$s = \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^N (\overline{X_{hi}} - \bar{x})^2] + [\sum_{i=1}^N (\overline{X_{vi}} - \bar{x})^2]}{2N - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{245}{2(32) - 1}} = 2.8112$$

Finalmente se podrá determinar mediante la siguiente formula las betas promedio especialmente para el Al/6061-1%SiC<sub>p</sub>.

$$\beta_{promedio} = \left(\frac{s}{\bar{X}}\right)$$

$$\beta_{promedio} = \left(\frac{2.8112}{3.093}\right) = 0.9086$$

## Anexo B. Uso del software de análisis (Image Pro Plus) para la cuantificación de partículas en la matriz.

Se determinará cada paso de manera resumida para emplear el programa Imagen Pro Plus para la cuantificación de partículas en la matriz 6061.

Como primer paso se hace la calibración del programa. Esto es necesario emplear reglillas con una graduación de 1 mm, obtenidas con un microscopio óptico a un aumento de 100x. Posteriormente la imagen obtenida se ingresa al analizador y en la opción de medición se podrá calibrar en función de la figura B.1.

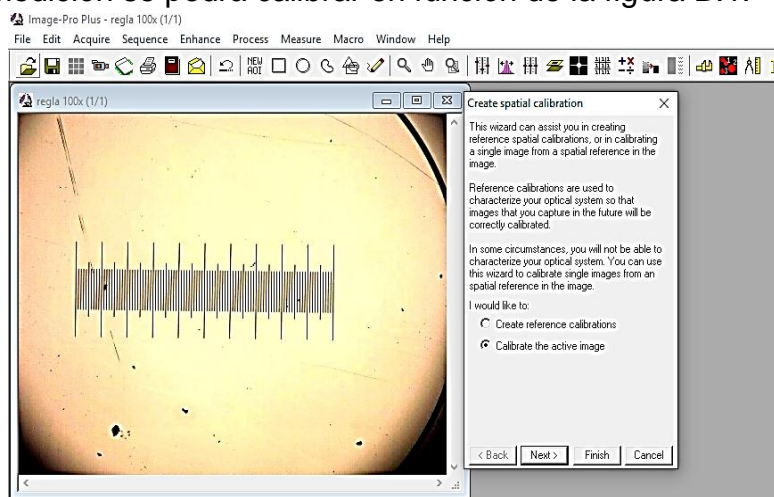


Figura B.1.1 Calibración del analizador de imágenes.

Al finalizar la calibración, el siguiente paso es abrir una imagen como ejemplo del refuerzo de carburo de silicio a 100x que se obtuvo del microscopio óptico para realizar la cuantificación de partículas en la matriz Al-6061. Se selecciona la imagen del icono de "open document for disk", como se muestra en la figura B.2.

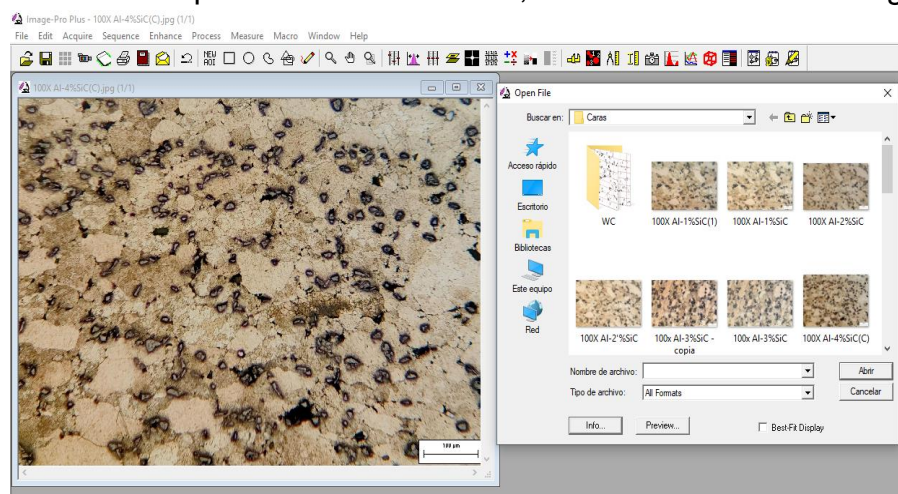


Figura B.2. Selección de imágenes.

Posteriormente para poder determinar las partículas, en la barra de herramientas se selecciona la opción de editar, y después la opción de convertir a escala de grises (figura B.3).

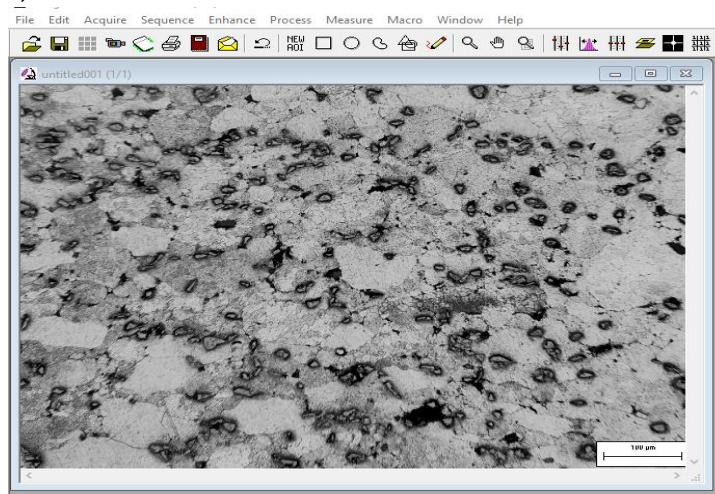


Figura B.3. Cambio a escala de grises.

Obteniendo nuestra imagen en escala de grises, se escoge la opción de “contraste” para editar la imagen a tal grado que se puedan definir de mejor manera las partículas, haciendo la matriz de color blanco para su cuantificación (figura B.4).

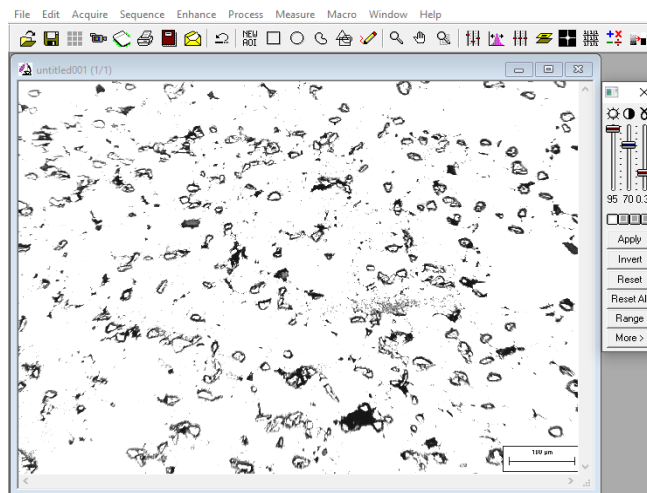


Figura B.4. Contraste aplicado a imagen para determinar la cuantificación.

El siguiente paso es realizar una cuadrícula sobre la imagen, para medir la distribución de partículas en la matriz. Debido a que se va a ocupar el método del cuadrante se harán 8 líneas verticales y 8 líneas horizontales y así obtener 64 cuadrantes. Para poder determinarlo, en la barra de herramientas de opción “measurements”, se abrirá una ventana en la cual en la parte superior de lado izquierdo se encuentra la opción de “create click and drag line feature”, se

selecciona y de manera manual se crea los 64 cuadrantes como se muestra en la figura B.5.

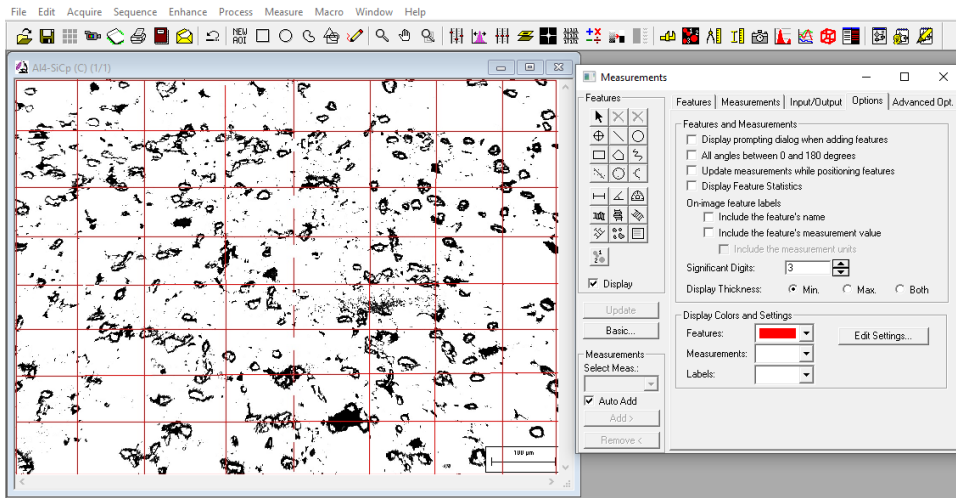


Figura B.5. División por 64 cuadrantes para determinación de betas.

Al tener la cuadrícula, el programa nos podrá determinar la cantidad de partículas en la matriz, esto debido a que existe una herramienta denominada “count/size” que se encuentra en la barra de herramientas. La función de esta es poder contabilizar las partículas en función del área, diámetro, promedio, radio máximo etc. Esto se encuentra en la opción de “select measurements”. Al tener esa opción podremos editar que tamaño mínimo y máximo para que exista una homogeneidad en la hora de contar las partículas. Cabe resaltar que este método no contabiliza los defectos y los aglomerados los contabiliza como una partícula por lo que no puede ser tan preciso como se muestra en la figura B.6.

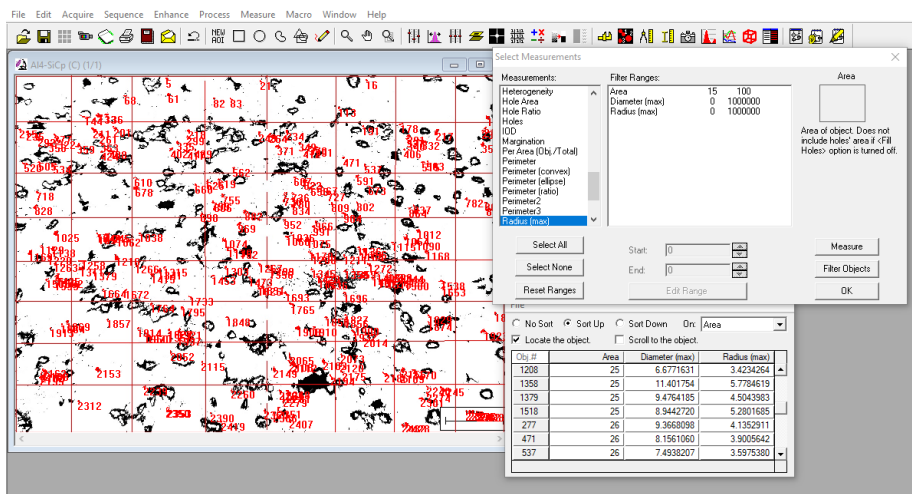


Figura B.6 Conteo de partículas mediante el uso del software.

Finalmente, obteniendo las condiciones de las partículas se podrá determinar la estadística de las partículas en la opción de “count/size”, donde se abre una ventana y se da click en la opción de “view”, que abre otra ventana y en “statistics”, podremos encontrar toda la información.

El procedimiento se repite para cada muestra y se realiza la estadística en función del método utilizado para determinar si la distribución es homogénea o heterogénea.

## Capítulo 6

### Bibliografía.

1. Marsden, W., & Warde, S. (2010). Data Management for Composite Materials. Granta technical paper. (pp. 1-17).
2. Dawes, J., Bowerman, R., & Trepleton, R. (2015). Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain. Johnson Matthey Technology Review. (pp. 243–256).
3. Marsh, E., & Marsh, E. (2016). The Powder Metallurgy Industry Worldwide. Materials technology. (pp. 99-103).
4. [www.http://businesswire.com/news/home/201702230055837](http://businesswire.com/news/home/201702230055837)
5. Das, D. K., Mishra, P. C., Singh, S., & Pattanaik, S. (2014). Fabrication and heat treatment of ceramic-reinforced aluminium matrix composites. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. (pp. 1–15).
6. Haghshenas, M. (2016). Metal–Matrix Composites. University of Waterloo. (pp.1–28).
7. Moona, G., Walia, R. S., Rastogi, V., & Sharma, R. (2018). Aluminium metal matrix composites: A retrospective investigation. Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP), 56(2), 164-175.
8. Garg, P., Jamwal, A., Kumar, D., Sadasivuni, K. K., Hussain, C. M., & Gupta, P. (2019). Advance research progresses in aluminium matrix composites: Manufacturing & applications. Journal of Materials Research and Technology, 8(5). (pp.4924–4939)
9. Ravi KR, Sreekumar VM, Pillai RM, et al. Optimization of mixing parameters through a water model for metal matrix composites synthesis. Materials and Design. 2007; 28:871- 881. DOI: 10.1016/j.matdes.2005.10.007.
10. Adebisi, A. A., Maleque, M. A., & Rahman, M. M. (2011). Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 4(1), 471-480.
11. Berthelot, J. (1999). Composite Materials. Mechanical Behavior and Structural Analysis. (pp. 1-663).
12. Campbell, F. C. (2010). Structural Composite Materials. ASM International Materials Park. (pp. 1-629)
13. Chawla, N. & Chawla, K. (1986). Metal Matrix Composites. Springer (pp.1-406)
14. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70238/fichero/Capitulo+3.pdf>
15. Nturanabo, F., Masu, L., & Baptist Kirabira, J. (2019). Novel Applications of Aluminium Metal Matrix Composites. Intech Open. (pp.1-25).
16. Surappa M.K. (2003). Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities. Department of Metallurgy, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India. 28(1–2). (pp. 319–334).
17. Ghasali, E., Pakseresht, A. H., Agheli, M., Marzbanpour, A. H., & Ebadzadeh, T. (2015). WC-Co particles reinforced aluminum matrix by conventional and microwave sintering. Materials Research, 18(6). (pp.1197–1202)
18. Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites - From science to technological significance. Composites Science and Technology, 65. (pp. 2526–2540)

19. Srivatsan, T. S., Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., & Lavernia, E. J. (1991). Processing techniques for particulate-reinforced metal aluminium matrix composites. *Journal of Materials Science*, 26. (pp. 5965–5978).
20. Miracle, D. B., Donaldson, S. L., Henry, S. D., Moosbrugger, C., Anton, G. J., Sanders, B. R., ... & Scott Jr, W. W. (2001). *ASM handbook* (Vol. 21, pp. 107-119). Materials Park, OH: ASM international.
21. Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2016). *Aluminum Alloy Castings*. ASM International. (pp. 1-322).
22. Toozandehjani, M. (2018). Conventional and Advanced Composites in Aerospace Industry: Technologies Revisited. *American Journal of Aerospace Engineering*, 5(1). (pp. 9-15).
23. Vani, V. V., & Chak, S. K. (2018). The effect of process parameters in Aluminum Metal Matrix Composites with Powder Metallurgy. *Manufacturing Review*, 5,7. (pp.1-13).
24. <https://www.intechopen.com/books/advanced-casting-technologies/fabrication-of-aluminum-matrix-composites-by-stir-casting-technique-and-stirring-process-parameters->
25. Sahu, M. K., & Sahu, R. K. Fabrication of Aluminum Matrix Composites by Stir Casting Technique and Stirring Process Parameters Optimization, *Advanced Casting Technologies*, edited by TR Vijayaram (2018). DOI, 10, 111-126.
26. Urena, A., Martínez, E. E., Rodrigo, P., & Gil, L. (2004). Oxidation treatments for SiC particles used as reinforcement in aluminium matrix composites. *Composites Science and Technology*, 64(12). (pp. 1843–1854).
27. Walsh, F. C., & Ponce De Leon, C. (2014). A review of the electrodeposition of metal matrix composite coatings by inclusion of particles in a metal layer: An established and diversifying technology. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 92(2). (pp. 83–98).
28. Maurin, G., & Lavanant, A. (1995). Electrodeposition of nickel/silicon carbide composite coatings on a rotating disc electrode. *Journal of Applied Electrochemistry*, 25(12). (pp. 1113–1121).
29. Singh, V. K., Chauhan, S., Gope, P. C., & Chaudhary, A. K. (2015). Enhancement of Wettability of Aluminum Based Silicon Carbide Reinforced Particulate Metal Matrix Composite. *High Temperature Materials and Processes*, 34(2). (pp. 163–170).
30. Fredrick Flumerfelt, J., & Fredrick, J. (1998). *Aluminum powder metallurgy processing*. Iowa state University. (pp.1-165).
31. Dawes, J., Bowerman, R., & Trepleton, R. (2015). Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain. *Johnson Matthey Technology Review*, 59(3), 243-256.
32. Cervantes T.A.(1994). Caracterización de propiedades físicas, mecánicas y tribológicas de composito de matriz metálica obtenidos por pulvimetalurgia. (Tesis de licenciatura), Facultad de Química. UNAM. (pp. 1-236).
33. Álvarez R.M.F. (2019). Caracterización de propiedades tribológicas de compuesto de matriz metálica Al-SiC obtenidos por metalurgia de polvos. (Tesis de licenciatura), Facultad de Química. UNAM. (pp. 1-236).



34. Committee, M.B.D.a.D.L.S.A.I.H., ASM Handbook: Powder Metal Technologies and applications ed. ASM Handbook. Vol. 7. 2001, ASM International. 2605
35. ASTM B212-17. (2017) Standard Test Method for Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel. ASTM International, West Conshohocken, PA: ASTM International.
36. Oberacker, R. (2013). Powder Compaction by Dry Pressing. *Ceramics Science and Technology*, (pp. 3–37).
37. Of, J., & Engineering, M. (2012). Compaction, Sintering and Mechanical Properties of Al-SiCp Composites. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 3(3), (pp. 565–573).
38. Arockiasamy, A., German, R. M., Wang, P. T., Horstemeyer, M. F., Morgan, W., Park, S. J., & Otsuka, I. (2011). Sintering behaviour of Al-6061 powder produced by rapid solidification process. *Powder Metallurgy*, 54(3). (pp. 354–359).
39. Gürbüz, M., Can Şenel, M., & Koç, E. (2018). The effect of sintering time, temperature, and graphene addition on the hardness and microstructure of aluminum composites. *Journal of Composite Materials*, 52(4). (pp. 553–563).
40. Flores-Vélez, L. M., Chávez, J., Hernández, L., & Domínguez, O. (2001). Characterization and properties of aluminum composite materials prepared by powder metallurgy techniques using ceramic solid wastes. *Materials and Manufacturing Processes*, 16(1). (pp1–16).
41. Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., & Joy, D. (2007). Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM). *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*. (pp.1–40).
42. Lee, T., Senyuk, B., Trivedi, R. P., & Smalyukh, I. I. (2018). Optical microscopy of soft matter systems. *Fluids, Colloids and Soft Materials: An Introduction to Soft Matter Physics*. (pp. 165–186).
43. Akhtar, K., Khan, S. A., Khan, S. B., & Asiri, A. M. (2018). Scanning Electron Microscopy: Principle and Applications in Nanomaterials Characterization. In *Handbook of Materials Characterization* (pp. 113-145).
44. It, J. (2001). The Application of Scanning Electron Microscopy for the Characterization of Powders. O. Johari. S. Bhattacharyya. 1–14.
45. <https://www.philpoteducation.com/mod/book/view.php?id=779&chapterid=1031#/>
46. Yakaboylu, G. A., & Sabolsky, E. M. (2017). Determination of a homogeneity factor for composite materials by a microstructural image analysis method. *Journal of Microscopy*, 266(3), (pp. 263–272).
47. Hui, L., Smith, R. C., Wang, X., Nelson, J. K., & Schadler, L. S. (2008). Quantification of particulate mixing in nanocomposites. *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. (pp. 317–320).
48. Huei-Long, L., Wun-Hwa, L., & Sammy Lap-Ip Chan. (1992). Abrasive wear of powder metallurgy Al alloy 6061-SiC particle composites. *Wear*, 159(2), 223–231. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90305-R](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90305-R).
49. Sahu, P. S., & Banchhor, R. (2016). Effect of Silicon Carbide Reinforcement on Wear and Tribological Properties of Aluminium Matrix Composites. *IJSET -International*

Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 3(11), 293–299. Retrieved from [ijiset.com/vol3/v3s11/IJISSET\\_V3\\_I11\\_36.pdf](http://ijiset.com/vol3/v3s11/IJISSET_V3_I11_36.pdf).

50. Chen R., Iwabuchi A., Shimizu T., Seop Shin H., Mifune H., The sliding wear resistance behavior of NiAl and SiC particles reinforced aluminum alloy matrix composites, *Wear* 213 (1997) 175-184.
51. Sahin Y., Abrasive wear behaviour of SiC/2014 aluminium composite, Faculty of Technology, Gazi University, 06500, Besevler-Ankara, Turkey, *Tribology International* 43 (2010) 939–943
52. Conshohocken, W. (2007). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus 1. *Wear*, 1–5.
53. Axén, N., Hogmark, S., & Jacobson, S. (2000). Friction and wear measurement techniques. *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology*, (1987), 493–510. <https://doi.org/10.1201/9780849377877.ch13>.
54. Callister, W. D. (1995). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales* (Vol. 1). Reverté
55. ASTM, B 212-99. (2003). Apparent Density of free-flowing metal powders using the hall flowmeter Funnel. West Conshohocken, PA: ASTM International.
56. [https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation\\_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_(engineering))
57. <https://www.pinterest.com.mx/pin/133841420156179856/>
58. Askeland, D. R., & Wright, W. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. 3). México: International Thomson Editores
59. ASTM, B 213-03. (2003). Standard test methods for flow rate of metal powders. West Conshohocken, PA: ASTM International.
60. ASTM, G99-05. (2005). Standard test methods for Wear Testing with a Pin-on Disk Apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International.
61. ASTM, E9 89a. (2000). Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature. West Conshohocken, PA: ASTM International.
62. S. Özbilen, A. Ünal, T Sheppard, Influence of Oxygen on Morphology and Oxide Content of Gas Atomized Aluminium Powders, Department of Materials, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
63. Karl U. Kainer, *Metal matrix composites, Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
64. Zulai Li, Pengfei Wang, Quan Shan, Yehua Jiang, He Wei and Juan Tan, The Particle Shape of WC Governing the Fracture Mechanism of Particle Reinforced Iron Matrix Composites, (2018), School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China.
65. Bai-Xin Dong, Feng Qiu, Qiang Li, Shi Li Shu, Hong yu Yang and Qi-Chuan Jiang The Synthesis, Structure, Morphology Characterizations and Evolution Mechanisms of Nanosized Titanium Carbides and Their Further Applications (2019), Key Laboratory of Automobile Materials, Ministry of Education and School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Renmin Street NO. 5988, Changchun 130025, China.

66. FERNÁNDEZ-LAVÍN, A., & OVANDO-SHELLEY, E. Redondez y esfericidad de partículas de relaves mineros, utilizando programas automáticos (2018). CONACYT, Instituto de Ingeniería-UNAM, Coordinación de Geotecnia.
67. WO 2005/010244, Tadahiro Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi. Method for producing and cleaning a silicon carbide product. European Patent Specification,
68. US20110309376A1, Toru Hiyoshi, Keiji Wada, Takeyoshi Masuda, Hiromu Shiomi, Method of cleaning silicon carbide semiconductor device, European Patent Specification.
69. Zekentes Konstantinos y Vasilevskiy Konstantin, Advancing Silicon Carbide Electronics Technology I. Metal contacts to silicon Carbide: Physics, Technology Applications, (2018), Material Research Forum LLC, pp. 1-5
70. H. Carvalhinhos, T. Marcelo and M. Carvalho, Geometrical Limitations to the homogeneous mixing of metal and ceramic Powders On Fabricating Al Matrix/SiC Composites, Volumen III: Processing and Manufacturing. Whistler, British Columbia, Canada, pp.1-7.
71. H. E. Exner: Met. Sci., 1982, 16, 451–455.
72. D. L Johnson: ‘Solid state sintering’, in ‘Encyclopedia of material science and engineering’, (ed. M. B. Bever), Vol. 6, 4520–4525; 1986, Oxford, Pergamon Press.
73. Lumley Roger, Fundamentals of aluminium metallurgy “production, processing and applications”, Woohed publishing (2011), pp. 655-694.
74. Suk-Joong L. Kang (2004) Sintering: Densification, Grain Growth, and Microstructure, 1st edn, Butterworth-Heinemann (available via ScienceDirect).
75. Dewan Muhammad Nuruzzaman, Farah Fazira Binti Kamaruzaman, and Nasrah Binti Mohd Azm, Effect of Sintering Temperature on the Properties of Aluminium-Aluminium Oxide Composite Materials, International Journal of Engineering Materials and Manufacture (2016).
76. B. Leszczyńska-Madej, the effect of Sintering Temperature on Microstructure and Properties of Al-SiC composites, Archives of Metallurgy and Materials (2013), Volume 58.
77. Beata Leszczyńska-Madeja, Dariusz Garbiecb , Effect of sintering temperature on microstructure and selected properties of spark plasma sintered Al-SiC composites, AGH University of Science and Technology, Faculty of Non Ferrous Metals, Department of Materials Science and Non-Ferrous Metals Engineering.
78. M. Rahimian, et al., The effect of sintering temperature and the amount of reinforcement on the properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite, Mater. Des. 30 (2009) 3333–3337.
79. A.U. Padmavathi, Densification, microstructure and properties of super solidus liquid phase sintered 6711 Al-SiC metal matrix composites, Sci. Sinter. 42 (2010) 363–382.
80. H.R. Hafizpour a,b, M. Sanjari a , A. Simchi a,c, Analysis of the effect of reinforcement particles on the compressibility of Al–SiC composite powders using a neural network model, Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, P.O. Box 11365-9466, Azadi Avenue, 14588 Tehran, Iran (2009).
81. Sharma SC (2001) The sliding wear behavior of Al<sub>6</sub>O<sub>6</sub>1–garnet particulate composites. Wear 249:1036–1045.

82. Pradeep K. Rohatgi, Meysam Tabandeh-Khorshid, Emad Omrani, Michael R. Lovell, and Pradeep L. Menezes, Tribology of Metal Matrix Composites.
83. V. Kavimania,\* , K. Soorya Prakasha , Titus Thankachan, Experimental investigations on wear and friction behaviour of SiC@r-GO reinforced Mg matrix composites produced through solvent-based powder metallurgy (2019), SciendDirect pp. 509-520.
84. Yueguang Wei: Particulate size effects in the particle-reinforced metal-matrix composites, Acta Mechanical Sinica,17, 1 (2001), 45–58.