



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA DE UN  
COMPUESTO DE MATRIZ METÁLICA DE Al – SiC  
OBTENIDO POR METALURGIA DE POLVOS”**

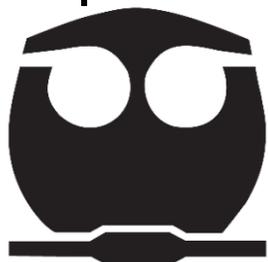
**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

Presenta:

**MARÍA FERNANDA ÁLVAREZ ROMERO**



Ciudad Universitaria, CDMX.

2019



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:

<b>Presidente</b>	Profesor: Gerardo Arámburo Pérez
<b>Vocal</b>	Profesor: Sergio García Galán
<b>Secretario</b>	Profesor: María Gabriela González Flores
<b>1er Suplente:</b>	Profesor: Octavio Lozada Flores
<b>2do Suplente:</b>	Profesor: Juan Carlos Contreras Guzmán

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Facultad de Química, UNAM

**Asesor del tema:**

---

M en M Gerardo Arámburo Pérez

**Supervisor Técnico:**

---

M en I Itzel Reyes Chaparro

**Sustentante:**

---

María Fernanda Álvarez Romero

# Índice

Índice de figuras .....	iv
Capítulo 1. Marco teórico .....	1
1.1. Materiales compuestos .....	1
1.2. Interfase .....	2
1.2.1. Humectación de partículas .....	4
1.3. Materiales compuestos reforzados con partículas .....	4
1.4. Compuesto de Al - SiC .....	5
1.5. Pulvimetalurgia .....	7
1.5.1. Obtención de piezas por pulvimetalurgia .....	7
1.6. Métodos de producción de polvos .....	8
1.6.1. Métodos físicos .....	8
1.6.2. Métodos químicos .....	8
1.6.3. Métodos mecánicos .....	8
1.7. Atomización .....	9
1.7.1. Atomización con gas .....	9
1.8. Molienda .....	10
1.8.1. Aleaciones con partículas reforzantes .....	11
1.9. Propiedades de los polvos .....	12
1.9.1. Forma .....	12
1.9.2. Tamaño y distribución .....	12
1.9.3. Porosidad .....	12
1.9.4. Densidad relativa .....	13
1.9.5. Densidad aparente .....	13
1.9.6. Velocidad de derrame .....	14
1.9.7. Compresibilidad .....	14
1.10. Mezcla de polvos .....	15
1.11. Compactación .....	15
1.12. Sinterización .....	16
1.12.2. Variables involucradas en el proceso de sinterización .....	18
1.12.3. Energía superficial .....	19

1.12.4. Termodinámica, etapas y mecanismos del transporte de masa .....	20
1.13. Ventajas y desventajas de la metalurgia de polvos .....	22
1.13.1. Ventajas .....	22
1.13.2. Desventajas .....	22
1.14. Aplicaciones .....	22
1.15. Tribología .....	23
1.15.1. Fricción .....	23
1.16. Desgaste .....	23
1.16.1. Desgaste adhesivo .....	24
1.16.2. Desgaste abrasivo .....	24
1.16.3. Desgaste por corrosión .....	24
1.16.4. Desgaste por fatiga .....	24
1.17. Ensayo de desgaste (ASTM G – 99) .....	24
1.18. Ensayo de dureza .....	25
1.18.1. Ensayo de dureza Brinell (ASTM E – 10) .....	26
Capítulo 2. Objetivos .....	28
Capítulo 3. Procedimiento experimental .....	29
3.1. Atomización con aire .....	29
3.1. Molienda .....	30
3.2. Caracterización de polvo .....	30
3.2.1. Tamaño y distribución .....	30
3.2.2. Forma .....	31
3.2.3. Densidad relativa .....	31
3.2.4. Densidad aparente .....	31
3.2.5. Velocidad de derrame .....	32
3.3. Mezcla de polvos .....	32
3.4. Compactación .....	32
3.5. Sinterización .....	34
3.6. Preparación metalográfica .....	35
3.7. Análisis por microscopía óptica y electrónica de barrido .....	36
3.8. Densidad y distribución de partículas de SiC .....	36
3.9. Ensayo de desgaste .....	37

3.10. Ensayo de dureza .....	38
Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados .....	39
4.1. Caracterización del polvo .....	39
4.2. Compactación y sinterización.....	45
4.3. Microscopía óptica .....	46
4.4. Conteo de partículas .....	48
4.5. Análisis por microscopía electrónica .....	49
4.5.1. Atomización .....	49
4.5.2. Molienda .....	55
4.6. Ensayo de desgaste.....	62
4.7. Ensayo de dureza .....	65
Capítulo 5. Conclusiones .....	67
Referencias.....	68

# Índice de figuras

Figura 1. Esquema de estructura de un material compuesto. _____	1
Figura 2. Componentes de un material compuesto. _____	3
Figura 3. Esquema de material compuesto de matriz metálica con diferentes tipos de refuerzo. _____	5
Figura 4. Esquema de los procesos y operaciones para fabricar productos mediante metalurgia de polvos. _____	7
Figura 5. Método de atomización por gas en donde el metal fluye a través de la boquilla y se atomiza inmediatamente por el chorro de aire. Los polvos resultantes se recolectan en una cámara situada abajo. _____	10
Figura 6. Efecto de las bolas de molino sobre el polvo. _____	11
Figura 7. Diferentes formas de los polvos metálicos: a) esférica, b) redondeada, c) angular, d) acicular, e) dendrítica, f) irregular, g) microporosa. h) fragmentada. _____	12
Figura 8. De lado izquierdo, montaje para determinar la densidad aparente; de lado derecho, esquema de cubeta cilíndrica. _____	13
Figura 9. Cono flujómetro de Hall. _____	14
Figura 10. Densidad de los polvos en función de la presión. _____	15
Figura 11. Etapas de método convencional de compactación de polvos metálicos, a) llenado de matriz, b) compresión del polvo, c) expulsión. _____	16
Figura 12. Modelo de sinterización de dos esferas donde se forma un cuello entre ambas durante la sinterización y crece hasta el punto donde las esferas se fusionan en una sola esfera con un diámetro 1.26 veces mayor. _____	17
Figura 13. Proceso de sinterización; (1) la unión de las partículas se inicia en los puntos de contacto, (2) éstos crecen y se convierten en cuellos, (3) se reduce el tamaño de los poros que hay entre partículas, (4) se desarrollan límites de grano en las regiones donde había cuellos. _____	18
Figura 14. Representación de la estructura cristalina de un metal donde a) el cristal es perfecto y cada átomo está unido a un enlace atómico de forma repetitiva, b) una superficie libre del metal resulta en enlaces químicos distribuidos; son los enlaces químicos sin unión a un átomo los que dan la energía superficial. _____	20
Figura 15. Los poros se ubican en los límites de las partículas. Si el poro tiene diferente curvatura en la superficie delantera y en la trasera, hay un movimiento entre el poro y el límite de grano. _____	21
Figura 16. Curva típica del ensayo de desgaste que considera la pérdida de peso en función del tiempo. _____	25
Figura 17. Esquema del ensayo de dureza Brinell. _____	26
Figura 18. a) Cámara de atomización, b) tobera de atomización con dos entradas de gas en las orillas. _____	30
Figura 19. Matriz de dos punzones empleada para probetas de desgaste, a) punzón superior, b) punzón inferior. _____	33
Figura 20. Matriz de dos punzones empleada para probetas de dureza, a) punzón superior, b) punzón inferior. _____	34
Figura 21. Reactor de acero rodeado de un tubo de cobre construido para la sinterización de probetas. _____	35
Figura 22. Horno horizontal de resistencia utilizado para el proceso de sinterización. _____	35
Figura 23. Superficie del material de estudio seccionada en cuatro partes para el conteo y obtención de distribución de partículas de SiC. _____	37
Figura 24. Sistema tribológico para el ensayo de desgaste. _____	38
Figura 25. Distribución de tamaño de polvos de atomización. _____	41
Figura 26. Forma del polvo del compuesto de Al-SiC obtenido por atomización con aire. _____	42
Figura 27. Forma del polvo de Al – SiC obtenido por molienda _____	42
Figura 28. Microestructura de partículas de polvo a 20x del material compuesto obtenido por a) atomización, b) molienda. _____	43
Figura 29. Probetas compactadas y sinterizadas del material compuesto de aleación Al-SiC al 5% vol. obtenidas por a) atomización, b) molienda. _____	45
Figura 30. Microestructura del compuesto de Al- SiC obtenido por a) atomización, b) molienda a 10x. _____	47

Figura 31. Microestructura del compuesto de Al-Si obtenido por atomización en donde hay a) presencia de poros, b) microconstituyentes en límites de partícula, c) microconstituyente de coloración blanca, d) partícula de SiC. _____	50
Figura 32. Mapeo composicional obtenido por microanálisis de distintos elementos en una zona representativa con presencia de carburos de silicio en la matriz de atomización. _____	51
Figura 33. Espectros de microanálisis en, matriz metálica, intermetálico y eutéctico. _____	53
Figura 34. Microanálisis lineal de una partícula de SiC dentro de una matriz metálica de aluminio. De color amarillo la presencia de silicio y de color violeta la del aluminio. _____	54
Figura 35. Microanálisis lineal de la interfase entre la matriz y la partícula de carburo de silicio. _____	55
Figura 36. Microestructura del compuesto de Al-Si obtenido por molienda en donde se aprecia a) matriz sinterizada de aleación de Al con partículas de SiC, b) partículas de SiC rodeadas de segundos microconstituyentes en los límites de partículas, c) microconstituyente de distinta densidad a la matriz, d) partículas de SiC. _____	56
Figura 37. Mapeo composicional obtenido por microanálisis de distintos elementos en una zona representativa con presencia de carburos de silicio en la matriz de molienda. _____	57
Figura 38. Espectros de microanálisis en a) matriz metálica, b), c) compuesto intermetálico, d) eutéctico. _____	58
Figura 39. Microanálisis lineal de una partícula de SiC dentro de la matriz metálica de aluminio. De color violeta la presencia de silicio y de color azul la presencia de aluminio. _____	59
Figura 40. Análisis puntuales de los microconstituyentes presentes en los límites de las partículas. _____	60
Figura 41. Análisis para la diferenciación de microconstituyentes de mayor densidad dentro de la matriz. _____	60
Figura 42. Partículas de SiC rodeadas de una interfase que las une a la matriz de aluminio. _____	61
Figura 43. Análisis lineal de la interfase del material compuesto de molienda. _____	62
Figura 44. Pérdida de masa del material de polvos obtenidos por atomización y molienda en función de la distancia recorrida. _____	63

# Capítulo 1. Marco teórico

## 1.1. Materiales compuestos

Actualmente se requieren materiales con propiedades inusuales que no se pueden obtener con materiales convencionales como aleaciones metálicas, polímeros o cerámicos, por lo que se introducen los materiales compuestos o compósitos que son una de las clases más importantes de materiales de ingeniería por ofrecer propiedades extraordinarias, los cuales, a nivel microestructural, están constituidos por dos o más estructuras moleculares o fases diferentes y, a nivel macroestructural, se pueden definir como un sistema formado de diferentes macroconstituyentes que son químicamente diferentes e insolubles entre sí [1].

En principio, los materiales compuestos están formados por cualquier combinación de dos o más materiales y, aunque las combinaciones son muy amplias, se puede decir que la mayoría de los compuestos están formados por dos fases; la primera es denominada matriz, la cual es continua y contiene a la otra fase llamada dispersa o material de refuerzo en forma de partículas o fibras (Figura 1). Los constituyentes conservan su identidad de tal modo que pueden ser físicamente identificados y su interacción da como resultado un nuevo grupo de propiedades. La forma y el tamaño de los constituyentes individuales, su arreglo estructural y distribución, así como la cantidad relativa de cada uno de ellos son factores que influyen en el desempeño final del material compuesto [2].

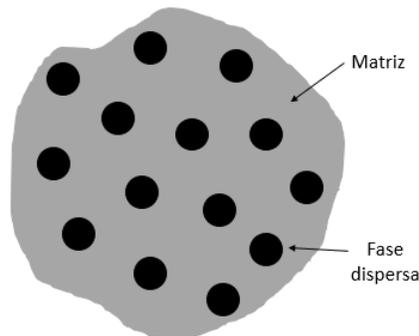


Figura 1. Esquema de estructura de un material compuesto.

En el diseño de materiales compuestos se han diseñado combinaciones de varios metales, polímeros y cerámicos para el desarrollo de una nueva generación de materiales

que pueden seleccionarse para proporcionar combinaciones poco usuales de propiedades mecánicas que encuentran especial aplicación en la industria aeroespacial, automotriz y de componentes para la ingeniería y pueden ser clasificados de varias maneras. Una de ellas se basa en la matriz: materiales compuestos de matriz metálica, cerámica y polimérica (CMM, CMC y CMP, respectivamente).

Los CMM, como su nombre lo indica, consisten en una matriz metálica reforzada por un segundo constituyente en forma de partículas cerámicas o fibras de otros materiales (boro o carbono, por ejemplo) [2].

La matriz tiene varias funciones. Primeramente, es la base del material compuesto; segundo, mantiene en su lugar a la fase dispersa y tercero, se encarga de distribuir la carga aplicada a la fase secundaria.

Las funciones que tiene un material reforzante dentro de un CMM son soportar las tensiones que se ejercen sobre el material, aumentar las características mecánicas de la matriz, su dureza y resistencia al desgaste y frenar o detener la propagación de grietas a través del material compuesto [3].

## 1.2. Interfase

Como los constituyentes son mezclados o combinados, siempre existe una región contigua llamada intercara, la cual es la superficie que forma la frontera común entre los constituyentes y es controlada para poder obtener las propiedades deseadas a partir de los materiales dados. En la mayoría de los casos, se tiene un límite bidimensional llamado interfase, la cual es una zona interfacial con grosor finito, llamada interfase o agente de enlace (figura 2), por lo que existen dos intercaras, una entre cada superficie de ésta y el elemento adyacente. La interacción entre el reforzante y la matriz es una variable de diseño y si el agente de enlace no es al menos tan fuerte como la matriz, ocurrirán fracturas y separaciones en la interfase bajo ciertas condiciones [4].

También se puede definir a la interfase como una discontinuidad en la composición química, módulo elástico, coeficiente de expansión térmica y/o propiedades termodinámicas. La interfase es muy importante en todo tipo de materiales compuestos.

En la mayoría de los CMM el refuerzo y la matriz no estarán en equilibrio termodinámico, es decir, habrá una fuerza motriz termodinámica que reducirá la energía del sistema. Todo esto hace que la interfase tenga una gran influencia en las propiedades del compuesto.

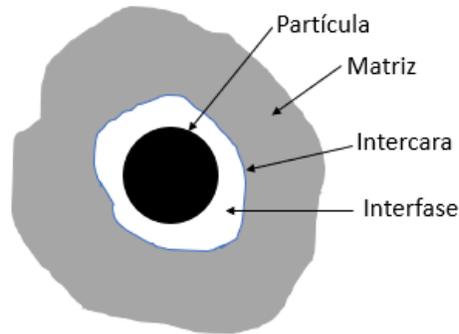


Figura 2. Componentes de un material compuesto.

La interfase estará en equilibrio a altas temperaturas, a las cuales los componentes se unen. A cualquier otra temperatura, existe un campo de tensión complejo en la zona límite debido a la falta de coincidencia en el coeficiente de expansión térmica de los materiales. Estas tensiones son proporcionales a la diferencia en los módulos elásticos de los componentes y diferencia de coeficientes de contracción térmica. Hablando termodinámicamente, las fases en la zona límite tenderán a cambiar a modo que la energía libre del sistema sea minimizada. Esto puede implicar la generación de dislocaciones, migración, nucleación y/o propagación de grietas. Una interfase ideal en un material compuesto debe promover la humectación y unir el refuerzo y la matriz en un grado deseable [5].

La interfase debe proteger el refuerzo cerámico y permitir la transferencia de carga desde la matriz metálica blanda hacia el material de refuerzo. Los componentes de un material compuesto se eligen en función de sus características mecánicas y físicas en aislamiento. Cuando se juntan dos componentes para hacer un compuesto, el sistema rara vez estará en equilibrio termodinámico. La mayoría de las veces, una fuerza impulsora estará presente para algún tipo de reacción interfacial entre los componentes que conduce a un estado de equilibrio termodinámico. La información termodinámica, como los diagramas

de fase, puede ayudar a predecir el estado de equilibrio final del compuesto. Datos sobre cinética de reacción, como las difusividades de un componente en otro, pueden proporcionar información sobre la velocidad a la que el sistema tenderá a equilibrarse.

#### 1.2.1. Humectación de partículas

Para obtener una mejora de las propiedades con la producción de materiales compuestos, la matriz en estado líquido debe impregnar al refuerzo para poder lograr una buena unión en la interfase.

La humectabilidad se define como la capacidad del líquido para extenderse por una superficie sólida. Una buena humectación significa que la matriz fluye perfectamente por la superficie del refuerzo y desplaza al aire [6].

### 1.3. Materiales compuestos reforzados con partículas

En la mayoría de los materiales compuestos la fase dispersa se encuentra de manera uniforme dentro de la matriz, además de ser más dura y resistente que ésta, las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan parte de la carga. El grado de reforzamiento o de mejora del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión en la intercara matriz – partícula [7].

Los compuestos de matriz metálica son comúnmente fabricados con aleaciones de aluminio, magnesio o titanio como matriz y tienen ventaja en cuanto a aplicaciones al agregar partículas cerámicas de refuerzo como carburo de silicio (SiC) o carburo de boro (BC), que tienen como característica que son abrasivos comerciales con buena resistencia al desgaste, así como una alta rigidez específica. Otros elementos como el carburo de titanio (TiC) o carburo de tungsteno (WC) también han sido aplicados por sus propiedades físicas y químicas. Así, en años recientes, los materiales cerámicos han sido ampliamente utilizados como elementos de refuerzo. Es importante mencionar que los materiales cerámicos son isotrópicos, es decir, tienen las mismas propiedades mecánicas en todas las direcciones.

Las partículas de carburo de silicio son atractivas como refuerzo debido a que se utilizan como abrasivo comercial debido a su disponibilidad y bajo costo. Además, ofrece un aumento en la resistencia mecánica, rigidez y resistencia al desgaste cuando se usan en un rango de 10 a 40% en volumen [3].

Los materiales de refuerzo se pueden clasificar en tres categorías; fibras continuas, whiskers y partículas. Estas últimas son el refuerzo de menor coste económico y es el que permite tener una mayor isotropía de las propiedades. La figura 3 muestra un esquema de los diferentes tipos de refuerzo [8].

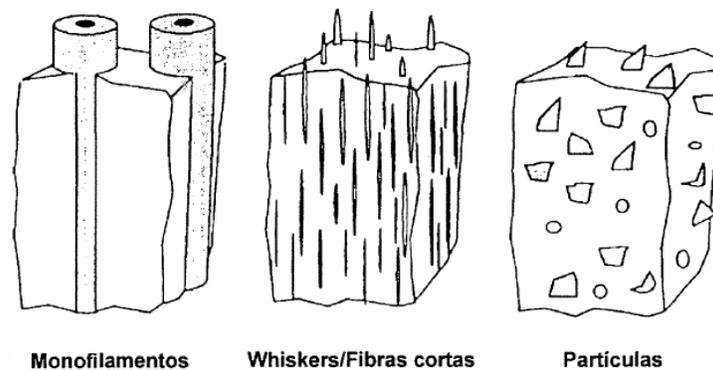


Figura 3. Esquema de material compuesto de matriz metálica con diferentes tipos de refuerzo.

La distribución de fases en los CMM es determinada por el proceso de fabricación utilizado, el cual también tendrá efecto sobre la microestructura de éste. La importancia de la distribución de las partículas reforzantes es que las propiedades mecánicas se verán afectadas por una distribución anisotrópica. Una dispersión de partículas heterogénea provoca variaciones indeseables en las propiedades. En el peor de los casos, la aglomeración de partículas puede provocar fallas prematuras [9].

#### 1.4. Compuesto de Al - SiC

El compuesto de aluminio reforzado con carburo de silicio es tan ligero como el aluminio, pero con una mayor resistencia y rigidez específica, así como una mejor resistencia a la formación de grietas, en comparación con las aleaciones no reforzadas. Las propiedades

características de los constituyentes en la microestructura del compuesto se relacionan directamente a las propiedades resultantes [3].

El uso de materiales compuestos no sólo depende de las propiedades requeridas; el precio de venta del producto terminado, el cual es influenciado por el costo de las materias primas y de la manufactura, es un factor crucial en la decisión de usar un compuesto en lugar de un material monolítico de fundición. Los costos de las materias primas son más bajos, dando como resultado altos volúmenes de producción [10].

La fabricación del material compuesto y del componente final frecuentemente se realiza en una sola operación, por lo que las propiedades deseadas, así como la forma del componente se deben considerar cuando se selecciona el proceso de fabricación más adecuado.

El compuesto de aluminio reforzado con carburo de silicio ha sido fabricado generalmente por la ruta de fundición convencional o a presión, mediante dispersión de las partículas en el metal líquido, y de ahí resulta el material compuesto que se vacía en los moldes apropiados. Debido a que las partículas de carburo de silicio son más densas que el aluminio ( $\rho_{SiC} = 3.23 \text{ g/cm}^3$  y  $\rho_{Al} = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ), éstas tienden asentarse cuando el aluminio se encuentra fundido, por lo que, debe de haber agitación del material líquido para evitar heterogeneidades en la distribución del carburo de silicio dentro de la matriz de la aleación aluminio [4,11].

La pulvimetalurgia se ha convertido en una industria que ha crecido ampliamente en los diferentes campos de la metalurgia debido a las ventajas que ofrece esta rama en la fabricación de partes metálicas que requieren alta precisión, como el control de la porosidad y acabado superficial de alta calidad [12].

Las ventajas de buscar una ruta alterna de la fabricación de compuestos de matriz metálica mediante metalurgia de polvos son: poder fabricar piezas que no pueden ser obtenidos mediante fundición debido a las limitaciones propias de la técnica como puede ser la forma de las piezas, incorporación inadecuada de las partículas, entre otras [13].

## 1.5. Pulvimetalurgia

La metalurgia de polvos es una rama reciente, pero extremadamente importante en la tecnología moderna. Esto se debe a las grandes ventajas que se tienen sobre otros métodos en ciertas aplicaciones. Esta rama permite realizar aleaciones de metales que son insolubles en estado líquido. También es posible producir piezas que contengan constituyentes no metálicos y metálicos. Una de las ventajas es la posibilidad de obtener materiales con porosidad controlada, lo que es imposible lograr mediante fundición [14].

El objetivo de la pulvimetalurgia es la obtención de un componente metálico a partir de polvos del metal. Por consiguiente, es natural que las características físicas y químicas de dichos polvos repercutan en los procesos de compactación y sinterización, así como las propiedades mecánicas que determinarán las propiedades de la pieza final. Es decir, la calidad del producto y la economía del proceso de fabricación dependen de las características de los polvos [15].

### 1.5.1. Obtención de piezas por pulvimetalurgia

La producción de piezas por pulvimetalurgia consiste, básicamente, en las siguientes operaciones mencionadas según el orden de la figura 4: [2]

1. Producción de polvo
2. Mezclado y combinación
3. Compactación
4. Sinterización
5. Operaciones secundarias y de acabado

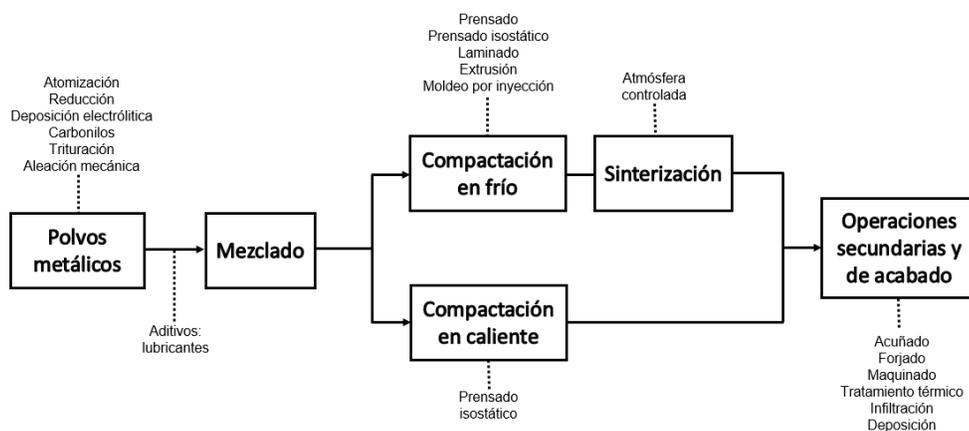


Figura 4. Esquema de los procesos y operaciones para fabricar productos mediante metalurgia de polvos.

## 1.6. Métodos de producción de polvos

Los polvos metálicos son aleaciones o metales puros finamente divididos en partículas, producidos por diferentes métodos, cada uno de los cuales les confiere características particulares y en la mayor parte de los casos los polvos se pueden obtener por más de un método. La elección depende de los requisitos del producto final, lo que significa que la forma, tamaño, distribución, porosidad y pureza química dependen del proceso utilizado [2,15].

Prácticamente cualquier metal puede reducirse a la forma de polvo. Hay tres métodos principales para producir comercialmente polvos metálicos, cada uno de los cuales implica un consumo de energía para incrementar el área superficial del metal [16]. Los métodos empleados en la producción de polvos se pueden dividir en las siguientes categorías: físicos, químicos y mecánicos.

### 1.6.1. Métodos físicos

El método más extendido es el electroquímico, el cual es muy utilizado en la preparación de polvo de cobre, berilio, hierro y níquel. El ajuste de las condiciones del proceso de electrodeposición hace posible que el metal se deposite en forma de escamas en el cátodo. Este método proporciona polvo metálico de alta pureza [13].

### 1.6.2. Métodos químicos

Los métodos químicos hacen uso de reacciones químicas para producir polvos metálicos directamente de sus compuestos a temperaturas muy por debajo del punto de fusión de los metales en cuestión. Los aspectos termodinámicos y cinéticos del proceso son importantes. Estas reacciones se basan en la reducción de óxidos, la precipitación de la solución o de una sal, la inestabilidad química y la descomposición térmica de los compuestos [13].

### 1.6.3. Métodos mecánicos

Los métodos mecánicos están entre los más empleados para la producción de polvo e implican el uso de fuerzas mecánicas como la fuerza de compresión, corte o impacto para efectuar la reducción del tamaño de partícula. Ejemplos: trituración, molienda y atomización [13].

## 1.7. Atomización

Dentro de las técnicas más desarrolladas para producir polvos metálicos no ferrosos está el método de atomización. Prácticamente cualquier material que pueda fundirse, puede atomizarse y convertirse en polvo por medio de la desintegración del líquido. Este es el método más versátil y popular para producir polvos metálicos en la actualidad. La cantidad de polvos atomizados con aire es próxima a 250,000 toneladas por año, lo que hace aplicable este método a casi todos los metales puros o aleaciones [2,16].

### 1.7.1. Atomización con gas

El procedimiento básico empleado es hacer que el material líquido pase a través de un orificio localizado en el fondo de un crisol e incidir en una corriente de gas en el líquido del metal que está fluyendo (figura 5). El impacto del aire sobre el metal líquido y la rápida solidificación hacen que el metal aparezca en forma de pequeñas partículas. Las gotas en su trayectoria experimentan enfriamiento convectivo. La energía térmica es intercambiada entre las gotas con el medio, con el subsecuente enfriamiento y solidificación mientras se mueven, alcanzando una velocidad de enfriamiento de  $10^6$  °C/s. [2]

Para un determinado material, el proceso de atomización involucra muchas variables que se dividen en cuatro etapas (tabla 1). Estas variables incluyen parámetros específicos del proceso como diámetro del caudal y flujo del gas, así como propiedades físicas, químicas del metal como densidad, viscosidad, punto de fusión y tensión superficial. Para una determinada composición del metal y un diseño fijo de atomizador, cabe tener en cuenta, como variables importantes del proceso, el sobrecalentamiento y flujo del metal fundido, la temperatura, naturaleza y presión del fluido, además de otros factores procedentes del diseño, como las dimensiones de la tobera, la altura de caída, etc. [10,17]

Los polvos atomizados por gas son típicamente esféricos, con superficies relativamente lisas con una morfología celular o dendrítica. Una presión más alta y/o una distancia de chorro más pequeña producen polvo más fino. [16]

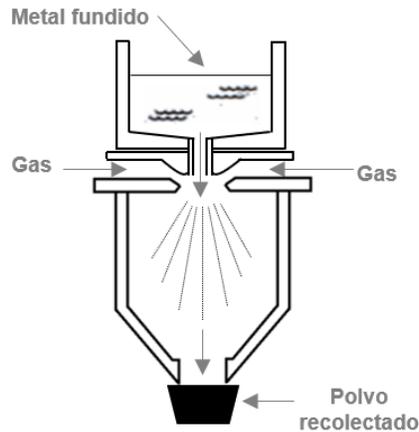


Figura 5. Método de atomización por gas en donde el metal fluye a través de la boquilla y se atomiza inmediatamente por el chorro de aire. Los polvos resultantes se recolectan en una cámara situada abajo.

Tabla 1. Etapas de atomización por gas y sus principales variables.

<b>Etapa</b>	<b>Variables</b>
1. Fusión	Atmósfera Sobrecalentamiento
2. Atomización	Diámetro del caudal Densidad Tensión superficial Viscosidad Geometría del atomizador Velocidad del metal y del gas Flujo másico del gas Presión del gas
3. Solidificación	Tiempo de solidificación Tamaño de partícula Medio de enfriamiento Trayectoria Transferencia de calor
4. Recolección	

### 1.8. Molienda

Se trata de un proceso de obtención de polvos con un tamaño extremadamente fino mediante el impacto del material compuesto con un material más duro. Consiste en un

molino lleno de bolas, las cuales, mediante el movimiento del molino, generan un impacto entre las bolas y el material que se encuentra dentro del molino.

Durante este proceso, el polvo atrapado entre las bolas de molino es plásticamente deformadas y fracturadas. Las superficies de polvo, nuevas y limpias, creadas por esta molienda, son soldadas en frío cuando se ponen en contacto y, de esta manera, los componentes se mezclan mecánicamente para unirse en partículas del material compuesto. En consecuencia, durante esta etapa, suele aumentar el tamaño de partícula. Conforme el proceso de molienda continua, se obtiene energía introducida por la deformación plástica, haciendo que las partículas se endurezcan y se fragilicen, por lo que las partículas se rompen cuando son golpeadas por las bolas de acero. Este proceso de soldadura en frío y fractura se ocurre repetidamente durante el proceso (Figura 6). [18]

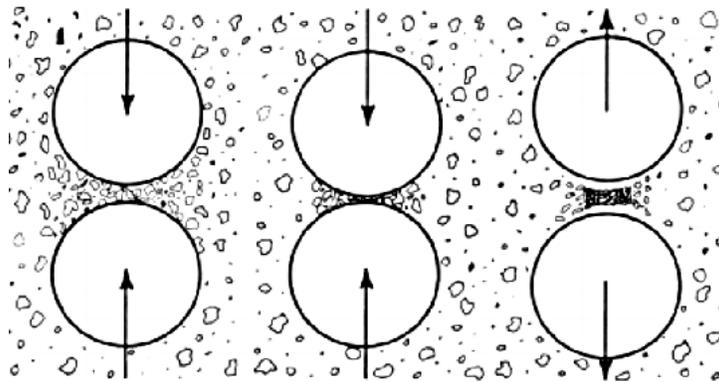


Figura 6. Efecto de las bolas de molino sobre el polvo.

Uno de los principales inconvenientes de la molienda es la posible contaminación del material, ya que el polvo de ciertos materiales muy duros puede producir el desgaste y posteriormente la introducción de pequeñas partículas de material de las bolas de molino.

#### 1.8.1. Aleaciones con partículas reforzantes

En la molienda, los metales blandos y dúctiles tienden a recubrir y rodear a los materiales más duros y frágiles. En general, el material blando tiende a formar una matriz en la que el material duro se encuentra disperso. Así, al crear el material compuesto Al – SiC, habrá una dispersión de carburos en la matriz metálica.

## 1.9. Propiedades de los polvos

Las propiedades de los polvos procedentes de un mismo metal dependen principalmente del método de producción. Las propiedades fundamentales definen básicamente el tipo de polvo: forma, composición, tamaño, distribución y porosidad. [2]

### 1.9.1. Forma

Dependiendo del método empleado para la obtención de polvo, se obtiene una geometría característica de la partícula, la cual se puede caracterizar por microscopía óptica o electrónica de barrido. Las diferentes formas que presentan los polvos se representan en la figura 7 [15].

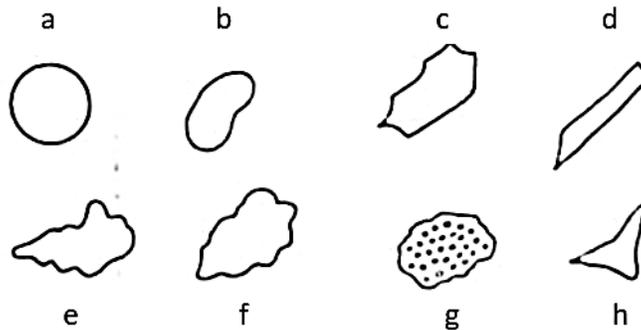


Figura 7. Diferentes formas de los polvos metálicos: a) esférica, b) redondeada, c) angular, d) acicular, e) dendrítica, f) irregular, g) microporosa. h) fragmentada.

### 1.9.2. Tamaño y distribución

El tamaño se refiere a las dimensiones que tiene las partículas. En los procesos de obtención de polvos no se puede obtener un solo tamaño de partícula, por lo que se hace necesario introducir el término de distribución, que define la desviación de tamaños del conjunto y repercute en las características secundarias del polvo.

### 1.9.3. Porosidad

La porosidad se define como la relación del volumen de los poros (espacios vacíos) en el polvo, la cual puede presentarse debido al método de obtención empleado.

Las propiedades secundarias se derivan de las fundamentales, y su determinación es importante durante el llenado y el prensado. Entre ellas cabe citar la densidad aparente, flujo o velocidad de derrame y compresibilidad [2, 15].

#### 1.9.4. Densidad relativa

Es la cantidad de material que ocupa cierto volumen comparando dicho valor con la densidad de otra sustancia que se toma como referencia. Ambas densidades deben estar expresadas en las mismas unidades y en las mismas condiciones de temperatura y presión [19].

#### 1.9.5. Densidad aparente

Esta densidad se define como la cantidad de masa de un polvo por unidad de volumen de esta, incluyendo su porosidad y el espacio entre partículas. Su medida se efectúa pesando un recipiente de volumen conocido enrasado con el polvo, conforme lo indica la norma ASTM B – 212. Esta medida depende de la forma de las partículas, su distribución de tamaño, así como de su porosidad, por lo que este valor siempre será menor al de la densidad real.

Según la norma, se llena el flujómetro Hall con una muestra de 50 g, el cual se coloca a una determinada altura normalizada de un recipiente de latón de 25 cm<sup>3</sup> que ha sido previamente tarado en la balanza (figura 8). A continuación, se hace fluir el polvo a través del flujómetro, llenando y rebosando el recipiente, el cual, posteriormente, se enrasa y se pesa. Finalmente se obtiene la densidad aparente como la relación entre la masa del polvo pesada y el volumen de la cubeta [20].

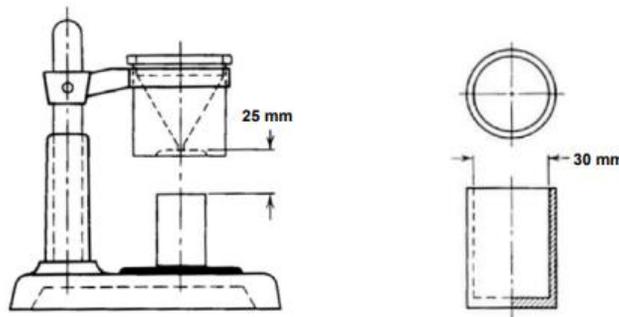


Figura 8. De lado izquierdo, montaje para determinar la densidad aparente; de lado derecho, esquema de cubeta cilíndrica.

### 1.9.6. Velocidad de derrame

La fluidez es la capacidad del polvo de fluir a través de un orificio que se encuentra en la base de un recipiente cónico. Si el polvo fluye, se define la velocidad de derrame como la razón entre la masa de polvo de la que se parte y el tiempo empleado para que dicha cantidad de polvo fluya por el orificio. La velocidad de derrame determina el tiempo necesario para que se llene la cavidad de la matriz para prensado. Para determinar esta propiedad, según la norma ASTM B – 213, se parte de una muestra de 50 g libre de humedad, la cual se coloca en el flujómetro Hall (figura 9), mientras se mantiene cerrado el orificio de descarga. Se toma el tiempo de manera simultánea al destapar el orificio para que el polvo fluya hasta que pase toda la masa. Esta propiedad depende de la forma y la distribución de tamaño del polvo, así como de los fenómenos de superficie que puedan presentarse [21].

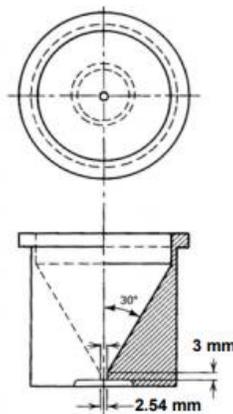


Figura 9. Cono flujómetro de Hall.

### 1.9.7. Compresibilidad

La compresibilidad del polvo es la reducción de volumen que se obtiene por prensado de este. Se emplea a fin de obtener una relación de compresión, definida como el cociente entre la densidad en verde y la densidad aparente. A mayor presión aplicada, la reducción de volumen es mayor, o sea una mayor densidad en verde.

## 1.10. Mezcla de polvos

Como los polvos fabricados tienen diferentes formas y tamaños, se deben mezclar para obtener uniformidad. La mezcla ideal es aquella en la que todas las partículas se distribuyen de manera uniforme. El mezclado puede referirse a la mezcla de polvos de la misma composición química, pero posiblemente diferente tamaño de partícula o a la mezcla de polvos de diferente composición química [1,2].

## 1.11. Compactación

En esta etapa tiene como objetivo consolidar en la forma y consistencia deseada a los polvos previamente mezclados, además de obtener el nivel deseado de porosidad. Consiste en aplicar una presión a la masa de polvo colocada dentro de una matriz. La densidad del comprimido o densidad en verde depende de la carga aplicada; al aumentar la presión de compactación, la densidad aumenta (figura 10).

La densidad en verde es de gran importancia para predecir las características mecánicas de la pieza acabada ya que, en la etapa de sinterización, dicha densidad apenas varía. Es por eso por lo que este valor suele estar controlado desde un principio. [2]

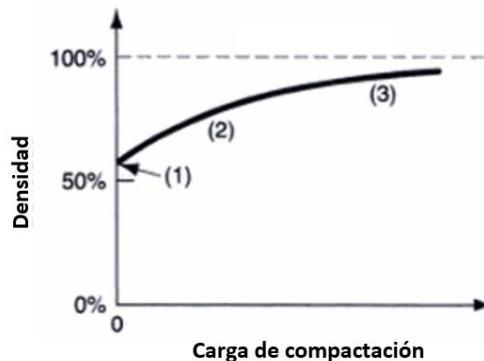


Figura 10. Densidad de los polvos en función de la presión.

En el proceso de obtención de piezas por compactación se distinguen tres etapas: llenado del molde, compresión y expulsión (figura 11). En la etapa de llenado, la cavidad de la matriz se llena de polvo (la cantidad se determina por volumen o peso) a un cierto tiempo y flujo. En la segunda etapa, la presión se ejerce con una prensa mecánica o hidráulica

hasta obtener la densidad en verde deseada. En la tercera etapa se expulsa la pieza consolidada que puede ser manipulada y está lista para el proceso de sinterización [2,8].

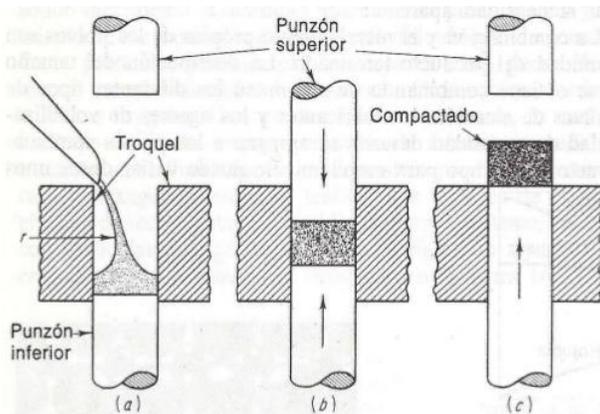


Figura 11. Etapas de método convencional de compactación de polvos metálicos, a) llenado de matriz, b) compresión del polvo, c) expulsión.

## 1.12. Sinterización

La sinterización es un tratamiento térmico para unir partículas en un sistema coherente y sólido, a través de eventos de transporte de masa que a menudo ocurren a escala atómica. La unión hace que la pieza tenga mayor resistencia y menor energía del sistema [22].

Básicamente, los procesos de sinterización se dividen en dos tipos: sinterización en estado sólido y en fase líquida. La sinterización en estado sólido ocurre cuando el polvo compacto se densifica completamente en estado sólido a una temperatura de sinterización, mientras que la sinterización en fase líquida ocurre cuando hay una fase líquida en el polvo compacto durante la sinterización [23].

Según el glosario de la norma ASTM B – 443. La sinterización sólida es la unión de las superficies de las partículas adyacentes en una masa de polvo previamente compactadas, por efecto de su calentamiento [24].

La sinterización de polvos no puede explicarse de manera simple debido a la diferencia de tamaños y formas de los polvos. Si se suponen partículas esféricas del mismo tamaño, se puede representar la sinterización de polvos compactados, como se muestra en la figura 12. En esta suposición, las dos partículas se fusionan para formar una sola esfera

más grande con un diámetro 1.26 veces el diámetro de las partículas esféricas iniciales [22,24].

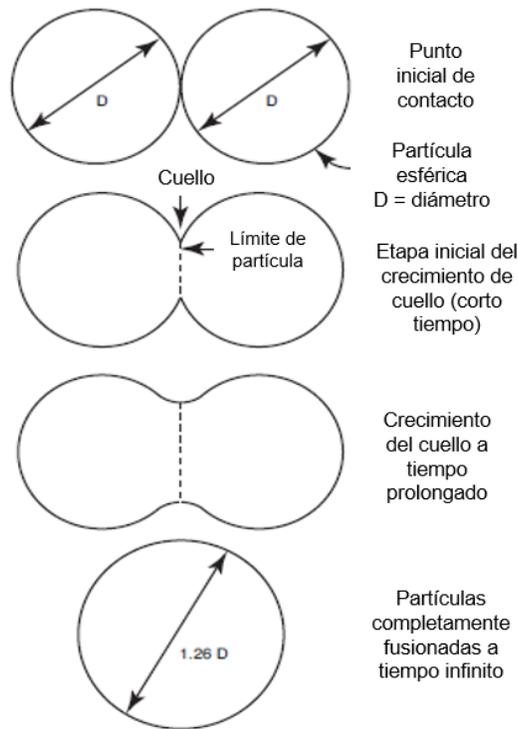


Figura 12. Modelo de sinterización de dos esferas donde se forma un cuello entre ambas durante la sinterización y crece hasta el punto donde las esferas se fusionan en una sola esfera con un diámetro 1.26 veces mayor.

En general, las etapas del proceso de sinterización tienen la siguiente secuencia:

1. Unión inicial entre partículas
2. Crecimiento del cuello
3. Cierre de canal de poro
4. Redondeo de poros
5. Densificación o contracción de poros
6. Engrosamiento de poros

La fuerza impulsora de la sinterización es la reducción de la energía interfacial total. Esta reducción ocurre a través de la densificación y el crecimiento de granos, como se ilustra en la figura 13; este es el fenómeno básico de la sinterización, por lo cual es necesario comprender y comprobar las variables involucradas en este proceso [22].

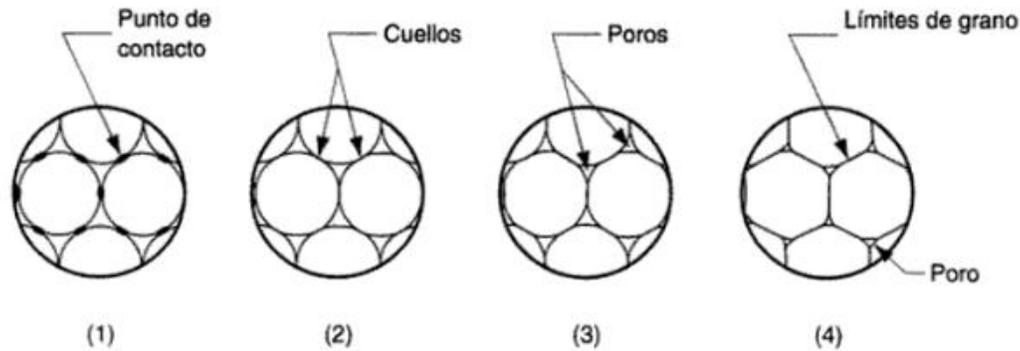


Figura 13. Proceso de sinterización; (1) la unión de las partículas se inicia en los puntos de contacto, (2) éstos crecen y se convierten en cuellos, (3) se reduce el tamaño de los poros que hay entre partículas, (4) se desarrollan límites de grano en las regiones donde había cuellos.

### 1.12.2. Variables involucradas en el proceso de sinterización

Las principales variables que determinan la sinterización y la microestructura de una pieza de polvo compactada se pueden dividir en dos categorías: variables del material y variables del proceso (tabla 2). Las variables del material incluyen composición química, forma y distribución del tamaño del polvo. Estas variables influyen en la compresibilidad y sinterización del polvo (densificación y crecimiento del grano). Las otras variables involucradas en la sinterización son principalmente las variables termodinámicas, como temperatura tiempo y atmósfera [22].

Tabla 2. Categorías de las variables que afectan la sinterización

Variables relacionadas con el material	Polvo: Forma, distribución de tamaño, aglomeración. Química: Composición, impurezas
Variables relacionadas con el proceso de sinterización	Temperatura, tiempo, presión, atmosfera, velocidad de calentamiento, velocidad de enfriamiento.

#### 1.12.2.1. Temperatura

Las temperaturas de sinterizado suelen ser de 70 a 90% del punto de fusión del material. El aumento de la temperatura de sinterización aumenta en gran medida la velocidad y la magnitud de cualquier cambio que ocurra durante el proceso de sinterización, ya que da la energía suficiente para que se activen los mecanismos del transporte de masa [16].

#### 1.12.2.2. Tamaño y distribución de partículas

El uso de polvos con una distribución de tamaños amplia a menudo resulta en un aumento en la densidad en verde, lo que reduce la contracción requerida para la densificación completa, además de que aumenta la presencia de poros finos. La densificación en el proceso de sinterización depende del empaquetamiento de las partículas. Entre mayor sea el rango de tamaño de partículas, se puede lograr una alta densidad final [22,23].

#### 1.12.2.3. Tiempo

La influencia del tiempo en el proceso de sinterización es pequeña en comparación con la dependencia que tiene con la temperatura. Si la temperatura de sinterización disminuye, el tiempo necesario para el proceso, aumenta exponencialmente. Es por eso que el proceso de sinterización debe tener temperaturas altas y tiempos cortos [16].

#### 1.12.2.4. Atmósfera

Casi todos los metales reaccionan con el oxígeno presente en la atmósfera incluso a temperatura ambiente y este fenómeno incrementa a altas temperaturas. El controlar la atmósfera durante el proceso de sinterización es para proporcionar protección al material contra la oxidación de los polvos metálicos. Además de evitar la oxidación, el gas dentro del horno es el encargado de la transferencia convectiva de calor hacia la pieza [16].

### 1.12.3. Energía superficial

En términos termodinámicos, la energía superficial es lo que causa la sinterización. Se genera el modelo de una superficie de un cristal ideal (figura 14a) donde los átomos ocupan un sitio específico de forma repetitiva. Entre los átomos hay enlaces, representados por líneas. Si se rompieran estos enlaces, la superficie resultante consistiría en enlaces rotos, los cuales proporcionan la interacción atómica responsable de la energía superficial. La figura 14b ilustra este concepto, donde la superficie está llena de enlaces rotos. La energía superficial se relaciona con la densidad de enlaces rotos por unidad de área [22]

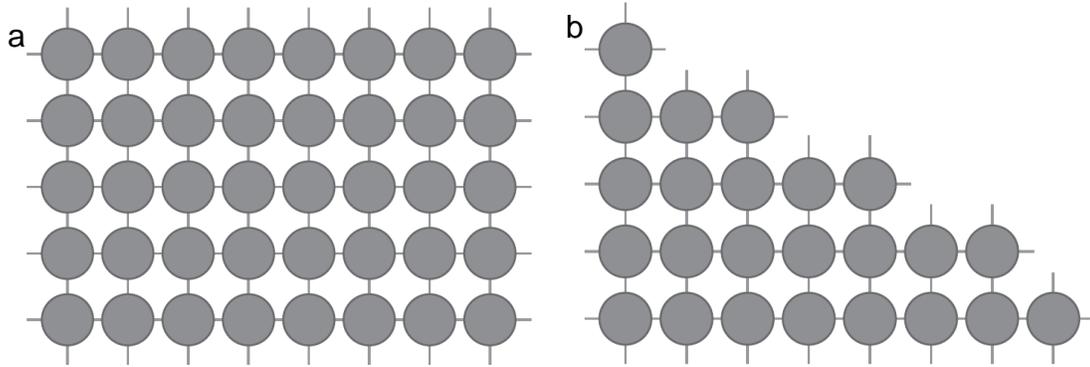


Figura 14. Representación de la estructura cristalina de un metal donde a) el cristal es perfecto y cada átomo está unido a un enlace atómico de forma repetitiva, b) una superficie libre del metal resulta en enlaces químicos distribuidos; son los enlaces químicos sin unión a un átomo los que dan la energía superficial.

#### 1.12.4. Termodinámica, etapas y mecanismos del transporte de masa

La reducción de la energía superficial es la fuerza impulsora que promueve la sinterización, pero para que el proceso se complete requiere el transporte de materia. En sólidos cristalinos, el transporte de material ocurre por difusión de átomos iones o movimiento de vacancias a lo largo de caminos definidos por los diferentes mecanismos de transporte.

Los mecanismos de transporte de masa indican como fluye la masa para disminuir la energía del sistema durante la sinterización. Los poros son grandes acumulaciones de vacancias, por lo que los mecanismos de sinterización describen el transporte de masa para la eliminación de vacancias. Las vacancias y los átomos se mueven a lo largo de las superficies de las partículas (difusión superficial), a través de los poros, a lo largo de los límites de grano y a través de la red [20,22].

Los procesos de difusión superficial provocan el crecimiento de cuellos entre partículas, provocando un cambio en el espacio entre partículas (contracción o densificación) ya que el flujo de masa empieza y termina en la superficie de la partícula. Los átomos se reorganizan, pero no se eliminan las vacancias. La difusión superficial domina la sinterización a bajas temperaturas.

Para que ocurra una densificación, el transporte de masa debe originarse desde el interior y terminar en el límite de la partícula. La eliminación de vacancias se lleva a cabo en el límite de partículas mediante la reorganización de átomos. Para polvos compactados, la densidad de dislocaciones inicial es alta, pero los esfuerzos de tensión superficial son generalmente insuficientes para que haya transporte de masa con una trayectoria tan larga, por lo que se debe someter a un calentamiento para que este mecanismo sea dominante.

El enlace de partículas sinterizadas es una región crítica. Es el punto donde se depositan los átomos para reducir la energía superficial. Una vez que el tamaño del cuello alcanza un equilibrio termodinámico dictado por el ángulo dihedral, el cual es el ángulo que se forma por la unión de dos partículas (figura 15), no importa cuál es el mecanismo de transporte dominante. A partir de este momento, sigue el crecimiento de grano, los poros se distorsionan e intentan permanecer en los límites de grano, por lo que empiezan a migrar [23].

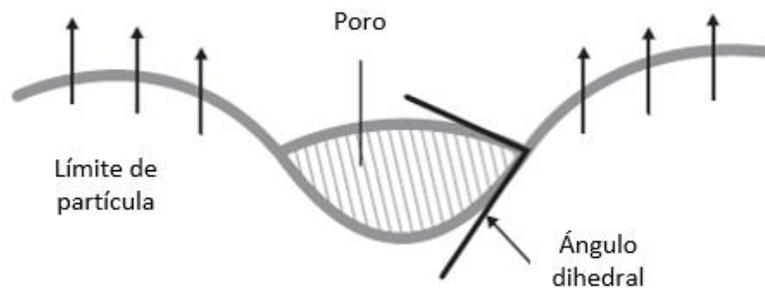


Figura 15. Los poros se ubican en los límites de las partículas. Si el poro tiene diferente curvatura en la superficie delantera y en la trasera, hay un movimiento entre el poro y el límite de grano.

La difusión superficial está activa durante el calentamiento a la temperatura de sinterización. La energía de activación para la difusión superficial es menor que la de otros medios de transporte, en consecuencia, se inicia a baja temperatura. La difusión superficial se va haciendo lenta conforme se consume la estructura del defecto en la superficie.

La difusión en volumen depende de la temperatura, composición y tamaño de partícula. En este mecanismo, el transporte empieza desde el interior de la partícula, hasta llegar a la superficie de ésta. El segundo camino se denomina densificación de volumen e implica

que las vacancias fluyan desde la superficie del cuello al límite de grano. Esto produce contracción y densificación.

Al final del proceso de sinterización, los poros restantes existen como colecciones de vacancias esféricas. Una diferencia de tamaño entre los poros conduce a un gradiente de concentración de vacancias. En consecuencia, se eliminan los poros pequeños y los grandes se engrosan, los cuales tienden a irse a los límites de grano [21,23].

### 1.13. Ventajas y desventajas de la metalurgia de polvos

#### 1.13.1. Ventajas

- Porosidad controlada
- Acabado superficial de alta calidad
- Poca o nula pérdida del material
- Alta precisión dimensional

#### 1.13.2. Desventajas

- El costo de la producción es alto
- Equipo costoso
- Se limita a piezas de tamaño pequeño

### 1.14. Aplicaciones

- Industria automotriz: cojinetes de clutch, ejes, bujes y cojinetes de transmisión, pistones de motor, rotores de bomba, caja del eje de levas, soportes de clutch, pistón de freno, entre otros.
- Materiales porosos: cojinetes lubricantes, electrodo poroso en baterías.
- Materiales antifriccionantes: cojinete de disco de freno, disco de clutch, juntas de cubierta para fricción, botones para frenos de avión.
- Materiales eléctricos: escobillas industriales de compósitos.
- Productos de forma complicada: engranes, rotores, tuercas.

## 1.15. Tribología

La palabra Tribología se deriva del término griego tribos, el cual se define como “frotamiento o rozamiento”, así que la interpretación de la palabra puede ser, “la ciencia del rozamiento”. En general, se define a la tribología como la ciencia y la tecnología de la fricción, el desgaste y la lubricación.

La tribología es crucial para la maquinaria moderna que utiliza superficies rodantes y/o deslizantes. La aplicación de los conocimientos de la tribología se deriva en ahorro de materias primas y aumento en la vida útil de las herramientas y maquinaria [25].

Un sistema tribológico está formado por dos o más cuerpos en contacto superficial dinámico o estático, y se generan una vasta clase de fenómenos. La tribología estudia entre otras cosas, la adhesión, fricción, desgaste y lubricación de sólidos en contacto [12].

### 1.15.1. Fricción

La fricción se puede definir como la resistencia al movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto. Se requiere fuerza para vencer esta resistencia y ésta se disipa en forma de energía calorífica que puede tener efectos negativos sobre una operación [2].

## 1.16. Desgaste

Es difícil tener una definición de desgaste que abarque toda la complejidad de este fenómeno. Una definición aceptada es la pérdida o remoción progresiva de material a partir de las superficies de un sistema tribológico, lo cual implica superficies de dos sólidos en contacto sometidas a una carga y que se encuentran en movimiento relativo [26].

El desgaste de las herramientas y maquinaria depende de las condiciones de fricción y las propiedades del material de la pieza. Hay varios mecanismos en que ocurre el desgaste. Operan en diferentes proporciones, dependiendo de las condiciones mecánicas. A continuación, se describen los principales tipos de desgaste en las operaciones de manufactura [2,27].

#### 1.16.1. Desgaste adhesivo

La interacción ocurre bajo pequeñas amplitudes de carga. Se caracteriza por dos superficies que se deslizan una sobre otra y ocurre la unión de asperezas; el movimiento continuo de las superficies requiere del rompimiento de las juntas enlazadas. Cada vez que se mueve un enlace se remueve una pequeña partícula (llamada partícula de desgaste) de una de las superficies, causando pérdida de material [2,28].

#### 1.16.2. Desgaste abrasivo

Se produce porque una superficie dura y áspera se desliza sobre otra superficie. Este tipo de desgaste desprende partículas formando astillas y produce así el rayado y el desgaste de la segunda superficie para formar y remover partículas de desgaste, resultando una progresiva pérdida de material [1,2].

#### 1.16.3. Desgaste por corrosión

En este mecanismo, una delgada película superficial se forma por oxidación u otras reacciones químicas. La película es más débil que el metal base, lo cual facilita la remoción de las capas superficiales por abrasión y otras acciones de desgaste. El mecanismo se repite y desgasta gradualmente la superficie hacia el interior; la remoción de la película superficial expone una nueva superficie al ataque químico, la cual reacciona, es removida y así sucesivamente [2,28].

#### 1.16.4. Desgaste por fatiga

También es llamado desgaste superficial o desgaste por fractura superficial, se produce cuando la superficie de un material se somete a cargas cíclicas. Las partículas de desgaste se suelen formar por desprendimiento superficial o por picadura. Otro tipo de desgaste es la fatiga térmica. Las grietas en la superficie se generan por esfuerzos térmicos debidos a ciclos térmicos [1].

### 1.17. Ensayo de desgaste (ASTM G – 99)

Para conocer los parámetros tribológicos se realizan pruebas en equipos que permiten reproducir determinadas situaciones de desgaste bajo cargas, lubricaciones, humedades y temperaturas distintas. Mediante dispositivos como el de pin o espiga sobre disco, bola

en disco, etc., donde una punta o una bola ejerce una carga fija sobre una probeta circular giratoria, es posible monitorear la fuerza de fricción en tiempo real y evaluar el desgaste producido al cabo de un cierto número de ciclos [29]. En la Figura 16 se presenta una curva típica que describe el comportamiento de los metales sometidos a procesos de desgaste bajo cargas del tipo espiga sobre disco (pin on disk en inglés) [27,30].

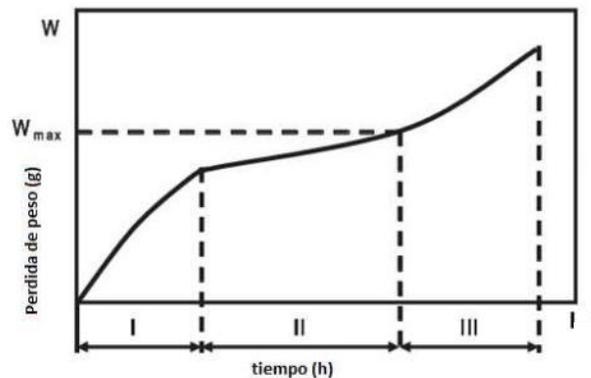


Figura 16. Curva típica del ensayo de desgaste que considera la pérdida de peso en función del tiempo.

Etapa I. Etapa de asentamiento: no hay equilibrio en el proceso, representa solo una pequeña porción del tiempo total de operación y se caracteriza por seguir una función exponencial.

Etapa II. Es la etapa más larga y estable del proceso y se caracteriza por su régimen de desgaste lineal.

Etapa III. Es la etapa del desgaste catastrófico y se asume el volumen del material removido de la superficie como partículas de desgaste.

### 1.18. Ensayo de dureza

La dureza de un material es la resistencia que opone a la penetración por un cuerpo más duro y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. La resistencia se determina introduciendo un cuerpo de forma esférica, cónica o piramidal, por el efecto que produce una fuerza determinada durante cierto tiempo en el cuerpo a ensayar. Como indicador de dureza se emplea la deformación plástica. [4]

Los diferentes métodos para medir la dureza de los materiales consisten en producir una deformación local, en el material de estudio, a través de un indentador. Los valores obtenidos son siempre dependientes de método y las condiciones a las que se realiza el ensayo. En general, la medición de la dureza nos sirve para establecer la correlación con otras propiedades como resistencia a la abrasión o resistencia al desgaste. Existen diversas pruebas de dureza, una de las más comunes es el ensayo de dureza Brinell [31].

#### 1.18.1. Ensayo de dureza Brinell (ASTM E – 10)

El ensayo de dureza Brinell es una prueba de dureza por indentación que proporciona información sobre materiales metálicos, la cual se puede relacionar con otras propiedades como resistencia al desgaste o ductilidad.

En este ensayo, según la norma ASTM – E10, se utiliza una máquina calibrada, llamada durómetro, la cual fuerza a una esfera de acero templado de diámetro  $D = 2.5, 5$  o  $10$  mm contra la superficie del material a ensayar con una carga o fuerza determinada  $F$  por un periodo de tiempo establecido (figura 17). Después de liberar la carga se mide el diámetro de la impresión  $d$  generada con un dispositivo amplificador óptico y se calcula el número o índice de dureza Brinell (abreviado como HB o HBN, por su nombre en inglés) a partir de la ecuación que relaciona la carga aplicada con el diámetro del indentador y de la huella generada en el material después de la indentación: [4,32]

$$HBN = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad ec (1)$$

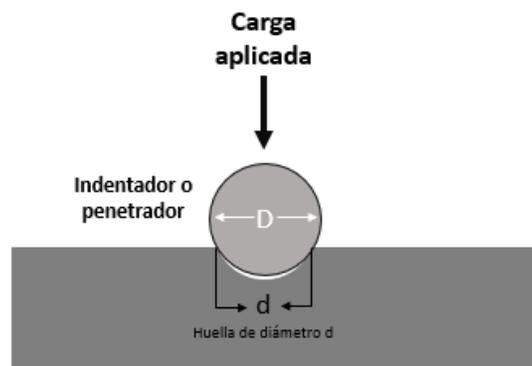


Figura 17. Esquema del ensayo de dureza Brinell.

La fuerza de ensayo debe tomarse de magnitud tal que se forme una huella con un diámetro  $d = 0.2D$  a  $d = 0.7D$ . Esta fuerza " $F$ " se calcula partiendo de la ecuación 2 donde " $a$ " es el grado de carga y " $D$ " el diámetro del indentador en mm. En la tabla 3 se presentan los valores de  $a$ , la cual relaciona el diámetro del indentador con la carga aplicada, la cual varía en función del tipo de material a estudiar.

$$F = a D^2 \quad ec (2)$$

Tabla 3. Criterio para la relación de carga en dureza Brinell.

<i>Material</i>	<i>a</i>
Ferroso	30
No ferroso duro	10
No ferroso blando	5

## Capítulo 2. Objetivos

- Obtener un material compuesto de matriz metálica de Al-SiC mediante los procesos de atomización con aire y molienda.
- Determinar las propiedades del material compuesto obtenido por atomización, ofreciendo una ruta alterna para la producción de dicho material.
- Caracterizar la interfase formada entre la matriz y las partículas reforzantes para establecer la influencia que ésta tiene sobre las propiedades del material compuesto.
- Determinar la resistencia al desgaste de una pieza producida por metalurgia de polvos de un compuesto metálico de Al- SiC por dos métodos de producción para comparar sus propiedades mecánicas.

## Capítulo 3. Procedimiento experimental

En este capítulo se describe el procedimiento que se siguió para obtener un material compuesto de matriz metálica de una aleación de aluminio reforzada con partículas de carburo de silicio por dos métodos: atomización con aire y molienda, para posteriormente obtener probetas que fueron compactadas y sinterizadas, las cuales se caracterizaron metalográficamente y se sometieron a ensayos de desgaste y dureza.

### 3.1. Atomización con aire

Para la producción de polvos se parte de un compuesto de aluminio con 10% volumen de carburo de silicio que fue diluido con una aleación de aluminio A356 hasta llegar a una composición de 5% volumen de SiC, aproximadamente, cuya composición química se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química de la aleación de aluminio A356.

%Si	%Mg	%Fe	%Cu	%Zn	%Mn	%Ti	%Al
6.50 – 7.50	0.25 – 0.45	0.20 máx.	0.20	0.10	0.10	0.20	Bal

Se utiliza una tobera de atomización de acero inoxidable con dos entradas (figura 18b). El aire proviene de un compresor, entra y comienza a circular en el cuerpo del atomizador y sale por la boquilla de la tobera formando un flujo de aire a cierta velocidad. En la parte central se tiene el orificio de 3/16" por donde fluye el metal líquido de diámetro para entrar en contacto con el flujo de aire, haciendo que el material, el cual fluye a 33ml/s, se atomice, solidifique y se recolecte al fondo de la cámara de atomización (figura 18a).

Para este proceso, el material compuesto y la aleación de aluminio se funden con un sobrecalentamiento de 290°C para compensar la pérdida de calor manifestada durante su traslado del horno a la cámara de atomización, el cual fue verificado con un pirómetro.

El metal fundido se vacía al crisol que tiene el orificio en el fondo al mismo momento que el flujo de aire pasa por la tobera para que el líquido y el aire impacten, se formen gotas de metal que rápidamente solidifican, obteniendo polvo metálico.

Para obtener polvos de la aleación A356 de aluminio, se realiza el mismo proceso de atomización, con las mismas condiciones.

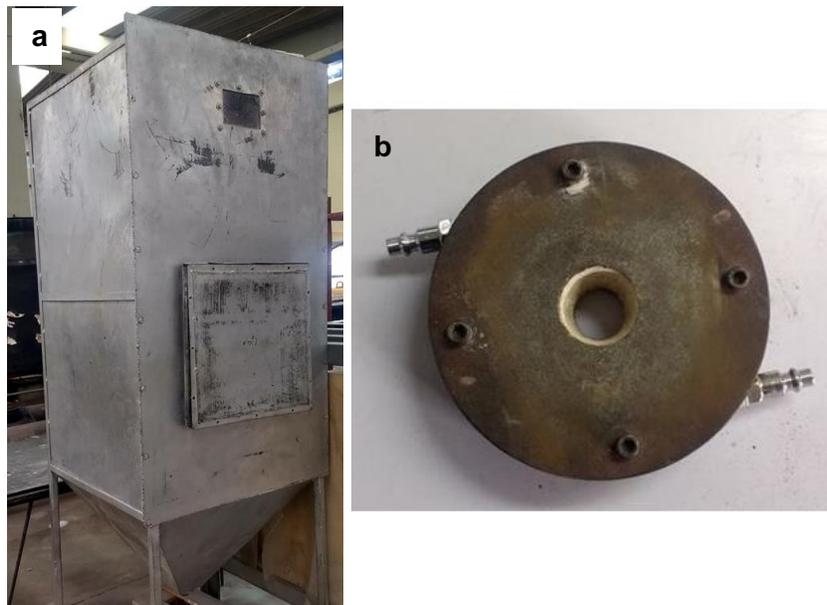


Figura 18. a) Cámara de atomización, b) tobera de atomización con dos entradas de gas en las orillas.

### 3.1. Molienda

A los polvos de aleación de aluminio obtenidos por atomización con aire con intervalo de tamaño de 150 a 75  $\mu\text{m}$ , se les añadió polvo de carburo de silicio de 37  $\mu\text{m}$  hasta obtener una composición de 5% volumen de SiC. El material se mezcló y se molió con un mortero y un pistilo con el objetivo de incrustar las partículas de SiC en el polvo de la aleación de aluminio. Cada 15 minutos, el polvo se observó en un microscopio estereográfico con el objetivo de visualizar que la mayoría de las partículas de SiC estuvieran incrustadas en la superficie del polvo.

### 3.2. Caracterización de polvo

#### 3.2.1. Tamaño y distribución

Se sigue el procedimiento de la norma ASTM B – 214 en donde se pesa la cantidad total de polvo obtenida y se divide en muestras representativas de 100 g. Cada muestra se adiciona a un conjunto de cribas, cuyo tamaño de apertura iba de mayor a menor, y se colocan en el sistema de clasificación Ro-Tap con un tiempo de residencia de 15 minutos.

Al finalizar, se realiza un registro de peso de la cantidad de polvo retenido en cada malla y así se obtiene la distribución de tamaño [33].

### 3.2.2. Forma

Una cantidad representativa del polvo se observó en el microscopio estereográfico para caracterizar su forma, capturando fotografías con el software DinoCapture 2.0 a 10 y 30 aumentos.

### 3.2.3. Densidad relativa

Para determinar la densidad relativa, se pesa un matraz aforado de 10 ml seco ( $m_m$ ), el mismo matraz aforado con alcohol etílico ( $m_{a+m}$ ), después con 2 g aproximadamente de polvo ( $m_{p+m}$ ) y, por último, con polvo y aforado con alcohol etílico ( $m_{a+p+m}$ ), para aplicar la siguiente relación:

$$\rho_{relativa} = \frac{m_{polvo}}{V_{polvo}} \quad \text{ec (3)}$$

En donde

$$m_{polvo} = m_{p+m} - m_m$$

$$V_{polvo} = \frac{m_{a+m} + m_{p+m} - m_{a+p+m} - m_m}{\rho_{alcohol}}$$

### 3.2.4. Densidad aparente

Se sigue la metodología especificada en la norma AST B – 212. Se pesan 11g de polvo, el cual fluye sobre el flujómetro a una altura de 5 cm para que caiga sobre un contenedor con un volumen de 5 cm<sup>3</sup> ( $V_{contenedor}$ ) previamente pesado ( $m_{contenedor}$ ) y se llenara hasta derramarse de polvo. Este se enrasa y se pesa ( $m_{polvo+contenedor}$ ) para obtener la relación de densidad aparente con base en la siguiente ecuación:

$$\rho_{aparente} = \frac{m_{polvo+contenedor} - m_{contenedor}}{V_{contenedor}} \quad \text{ec (4)}$$

### 3.2.5. Velocidad de derrame

Para la velocidad de derrame se sigue la metodología especificada en la norma ASTM B – 213. A las mismas condiciones empleadas para obtener la densidad aparente, se toma el tiempo que el polvo tarda en caer del flujómetro al contenedor. Los resultados se obtienen siguiendo la siguiente ecuación:

$$\dot{v} = \frac{m_{polvo}}{t} \quad \text{ec (5)}$$

### 3.3. Mezcla de polvos

Para el material de atomización, se mezclan los polvos de las mallas 140 y 200 (106 y 75  $\mu\text{m}$ , respectivamente). En el caso del material de molienda, el polvo de aluminio del mismo intervalo de tamaño se mezcla de forma mecánica con partículas de SiC, con base en la ecuación 6 en donde se agrega la cantidad necesaria para llegar a una composición de 5% volumen de SiC:

$$V_{comp} = 0.95 \left( \frac{m_{Al}}{\rho_{Al}} \right) + 0.05 \left( \frac{m_{SiC}}{\rho_{SiC}} \right) \quad \text{ec (6)}$$

Donde  $V_{comp}$  es el volumen total de polvos de la aleación de Al – SiC producidos,  $m$  la cantidad de polvo necesaria para combinar y  $\rho$  la densidad de los elementos del material compuesto.

### 3.4. Compactación

Se realiza el proceso de compactación para obtener piezas de polvo consolidadas utilizando una máquina de ensayos universales, en la cual se coloca una matriz de dos punzones para hacer el prensado en frío, usando estearato de zinc para lubricar las paredes y evitar el que el polvo de la aleación de aluminio se empaste; se aplica una carga de 8.5 ton. La figura 19 muestra la matriz utilizada para las probetas del ensayo de tensión, la cual tiene un diámetro de 10 mm y la figura 20 presenta la matriz usada para

las probetas del ensayo de dureza con un diámetro de 127 mm, para ambos casos, la altura de las probetas es de 5 mm.

Con base en las densidades relativa y aparente, en donde la masa y el área de las probetas son constantes, se realizó el cálculo de cantidad de polvo necesaria para obtener las probetas compactadas con base en la siguiente igualdad:

$$m_{ps} = m_{pc} \quad ec (7)$$

Se sabe que:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$V = A \cdot h$$

Por lo tanto:

$$m_{ps} = \rho_{relativa} \cdot A \cdot h \quad ec (8)$$

En donde  $m_{ps}$  es la cantidad de polvo antes de compactar y  $m_{pc}$  después de compactar, las cuales son constantes durante el proceso, por lo que se utilizan los valores de densidad relativa ( $\rho$ ), la altura ( $h$ ) y el área de la probeta después de ser compactada ( $A$ ).

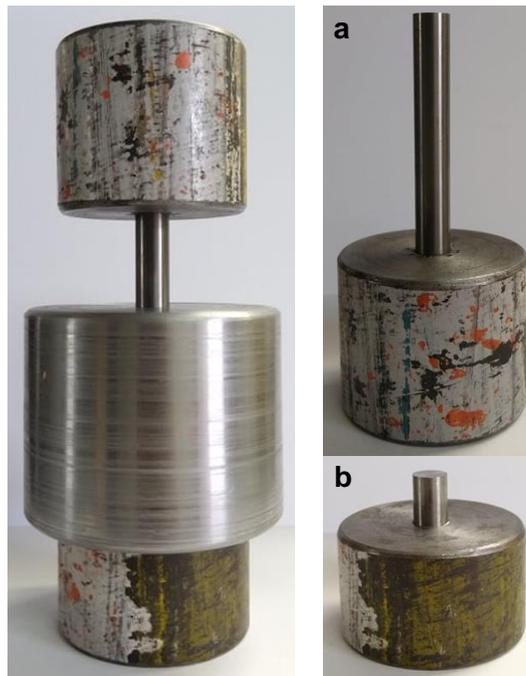


Figura 19. Matriz de dos punzones empleada para probetas de desgaste, a) punzón superior, b) punzón inferior.

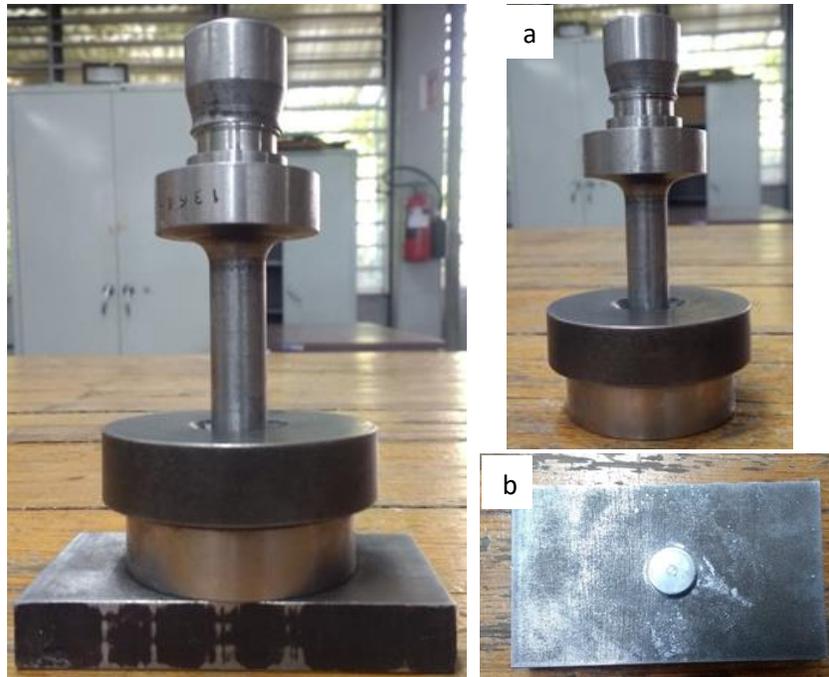


Figura 20. Matriz de dos punzones empleada para probetas de dureza, a) punzón superior, b) punzón inferior.

### 3.5. Sinterización

Se construye un reactor de acero (figura 21) el cual se rodea por la parte de afuera de un tubo de cobre con el fin de que el gas inerte se caliente antes de entrar al reactor y tenga contacto con las piezas. Se introduce una rejilla de acero inoxidable, la cual sostiene a las probetas con el objetivo de tener un mejor contacto entre el gas y todas las caras de las probetas.

El reactor se instala en un horno de resistencia (figura 22) el cual se lleva a una temperatura de 450°C, dando un tiempo de permanencia a las piezas de 2 horas. Estas condiciones se escogen con lo relacionado en la literatura [1].

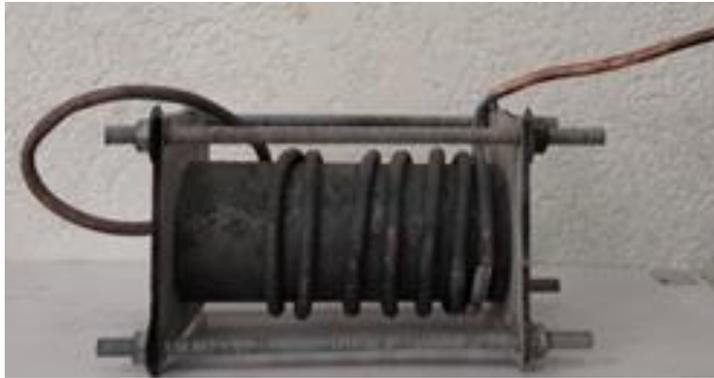


Figura 21. Reactor de acero rodeado de un tubo de cobre construido para la sinterización de probetas.



Figura 22. Horno horizontal de resistencia utilizado para el proceso de sinterización.

### 3.6. Preparación metalográfica

Para la caracterización microestructural del polvo obtenido por atomización, 1 g de polvo se montó sobre baquelita, se preparó metalográficamente en donde se desbastó y se pulió a acabado espejo con paño fijo y se atacó químicamente con Tucker II.

Con el fin de estudiar la constitución y microestructura de las piezas sinterizadas de aleación de Al – SiC, se realiza una preparación metalográfica, la cual consiste en cortar de manera transversal las probetas para posteriormente desbastarlas y pulirlas hasta obtener un acabado espejo con alúmina como abrasivo.

### 3.7. Análisis por microscopía óptica y electrónica de barrido

Utilizando un microscopio óptico metalográfico se realiza un análisis de la superficie de las probetas para poder apreciar la presencia y la forma de las partículas de carburo de silicio y la formación de cuellos entre partículas.

Para la determinación del nivel de reforzamiento en el material se capturan fotografías en distintas zonas en las cuales se contabiliza y determina la cantidad de partículas de carburo en un área, relacionando este resultado con el volumen total de las probetas.

Por la técnica de microscopía electrónica de barrido, en la cual se utiliza la señal de electrones retrodispersados, se realizaron análisis semicuantitativos y análisis lineales en áreas de interés como los distintos microconstituyentes que se observan en el material, así como análisis lineales en la interfase que hay entre la matriz y el las partículas de carburo de silicio.

### 3.8. Densidad y distribución de partículas de SiC

Para determinar la distribución y densidad de las partículas de SiC que están dentro de la matriz de aluminio se utiliza un microscopio óptico al cual se le instala una cámara con la cual se obtienen imágenes en determinadas zonas de la superficie a estudiar, en donde se pueden apreciar los carburos distribuidos homogéneamente o aglomerados. La captura de imágenes se realiza utilizando un software (DinoCapture 2.0), el cual nos permite realizar el conteo y determinar la distribución de las partículas.

Para determinar la distribución de las partículas, se dividen las imágenes en cuatro partes iguales que corresponden a un área de  $24.88 \text{ mm}^2$ , como se muestra en la figura 23 en las cuales se realiza el conteo de partículas en la zona, si la cantidad de partículas no difiere en las cuatro áreas, se dice que la distribución es homogénea; si la cantidad de partículas en las cuatro áreas es distinta, se tiene una distribución heterogénea.

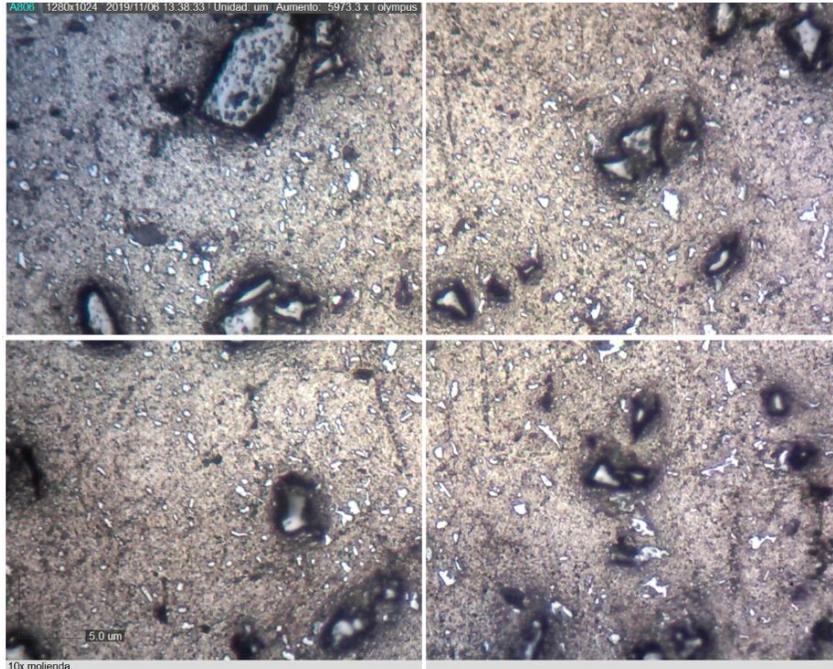


Figura 23. Superficie del material de estudio seccionada en cuatro partes para el conteo y obtención de distribución de partículas de SiC.

### 3.9. Ensayo de desgaste

Una de las formas estandarizadas para la medición y evaluación del desgaste de materiales, se establece a través de la norma ASTM G – 99, en donde se describe el procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste de dos materiales (un pin y un disco) que se encuentran en movimiento relativo, provocando una trayectoria de deslizamiento de forma circular sobre el disco. La primera probeta es un pin con punta redonda, la cual soporta una carga axial y se posiciona de forma perpendicular sobre la segunda muestra, la cual es un disco circular plano que puede ser orientado horizontal o verticalmente.

Para la realización de esta prueba se hacen modificaciones en las condiciones del ensayo y se utilizan probetas cilíndricas de superficie plana con diámetro de 10 mm y altura de 5 mm previamente sinterizadas, las cuales se colocan en un dispositivo que se instala de forma perpendicular a un rodillo en lugar de un disco plano y soporta una carga de 2.720 Kg. El cilindro se encuentra en movimiento relativo y gira a una velocidad de 250 rpm, dando como resultado la obtención de un sistema tribológico (figura 24), el cual consta

de las superficies del rodillo y la probeta que están en contacto móvil entre sí. El ensayo se realiza sin lubricantes y a temperatura ambiente. La duración de cada prueba fue de 4 horas en total, evaluando la pérdida de masa de las probetas cilíndricas en intervalos de 15 minutos.



Figura 24. Sistema tribológico para el ensayo de desgaste.

### 3.10. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza, el cual se basa en la resistencia a la penetración permanente bajo una carga que se le aplica a un material, se realizó con base en el procedimiento descrito en la norma ASTM E –10, en el cual se fuerza un indentador de acero endurecido de 5 mm de diámetro en la superficie de las probetas de Al – SiC previamente sinterizadas, las cuales tienen un diámetro de 127 mm y una altura de 5 mm, a una carga constante de 125 Kg por un tiempo de 30 s. El valor de dureza Brinell se denota HBN y es función de la magnitud de la carga y del diámetro de la huella resultante, la cual se mide con un microscopio y se obtiene un valor específico utilizando la siguiente fórmula:

$$HBN = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad ec (1)$$

## Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados que se obtuvieron en la realización de los diferentes procedimientos y ensayos para poder caracterizar y comparar las piezas del compuesto de aleación de Al – SiC obtenidas por dos métodos: atomización con aire y atomización.

### 4.1. Caracterización del polvo

El lingote utilizado para la fundición y atomización, así como las piezas compactadas y sinterizadas del material compuesto se analizaron por la técnica de fluorescencia de rayos x (FRX) para obtener la composición final de las piezas, estos resultados se presentan en la tabla 5.

El lingote analizado fue del material del material compuesto de una aleación A356 reforzado con partículas de SiC al 5%, el cual fue seccionado y atomizado para obtener polvo del material compuesto. El porcentaje de silicio es alto debido a que se analizó el presente en la aleación y el silicio de las partículas reforzantes. El porcentaje de hierro, el cual es una impureza, también es elevado, este valor, se sale del valor máximo permitido en una aleación puede deberse a que el lingote presentaba segregación.

Para las probetas de polvo de material compuesto obtenidas por los procesos de atomización y molienda, los porcentajes entran dentro del rango para la composición de una aleación A356; el único valor que es mayor es el del silicio. Esto es por la presencia de SiC dentro de la matriz. Comparando ambas probetas, la de molienda tiene mayor cantidad de silicio, lo que indica que se tiene una mayor cantidad de SiC.

Tabla 5. Porcentaje de los elementos presentes analizados por FRX.

	<b>%Si</b>	<b>%Mg</b>	<b>%Fe</b>	<b>%Cu</b>	<b>%Zn</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Ti</b>	<b>%Al</b>
Lingote	18.12	0.37	1.59	0.68	0.43	0.31	0.039	Bal
Atomización	9.01	0.49	0.79	0.29	0.50	0.11	0.17	Bal
Molienda	12.34	0.42	0.74	0.76	5.27	0.35	0.14	Bal

Las características de los polvos metálicos dependen de su método de obtención y de sus propiedades fundamentales (forma y distribución de tamaño), las cuales definen básicamente el polvo, además de que repercuten en los procesos de compactación y sinterización.

Los resultados del análisis granulométrico para la determinación de la distribución de tamaño de los polvos obtenidos por atomización con aire son presentados en la tabla 6, en donde se puede ver que hay una tendencia senoidal con tendencia a tamaños de partícula más pequeños, obteniendo la mayor cantidad de polvos en la malla 140 (106  $\mu\text{m}$ ).

La representación gráfica de esta distribución se muestra en la figura 25. Se muestra el porcentaje acumulado positivo, el cual representa la cantidad de polvo acumulado que no pasa a través de las mallas.

Relacionando la forma y el tamaño, los polvos con un tamaño mayor a 180  $\mu\text{m}$  representan casi un 50%, son demasiado grandes y de forma irregular para el proceso de compactación y sinterización; esto podría causar gran porcentaje de porosidad no deseada. Las partículas con un tamaño menor a 75  $\mu\text{m}$ , a pesar de tener forma más redonda, son demasiado pequeñas para poder trabajar con ellas. Por lo anterior, se toma la decisión trabajar con el polvo con un rango de tamaño menor a 180  $\mu\text{m}$  y mayor a 75  $\mu\text{m}$  para determinar las propiedades secundarias.

Tabla 6. Resultados del análisis granulométrico de los polvos obtenidos en atomización con aire.

<b>Malla</b>	<b>Tamaño (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>%Ac (+)</b>	<b>%Ac (-)</b>
30	+600	75.084	12.746	12.746	87.254
45	- 600 +355	66.758	11.332	24.078	75.922
60	-355 +250	76.145	12.926	37.004	62.996
80	-250 +180	72.184	12.254	49.258	50.742
100	-180 +150	55.718	9.458	58.716	41.284
140	-150 +106	90.828	15.418	74.134	25.866
200	-106 +75	68.960	11.706	85.841	14.159
230	-75 +63	25.467	4.323	90.164	9.836
Pan	-63	57.944	9.836	100.000	0.000
		589.088	100.000		

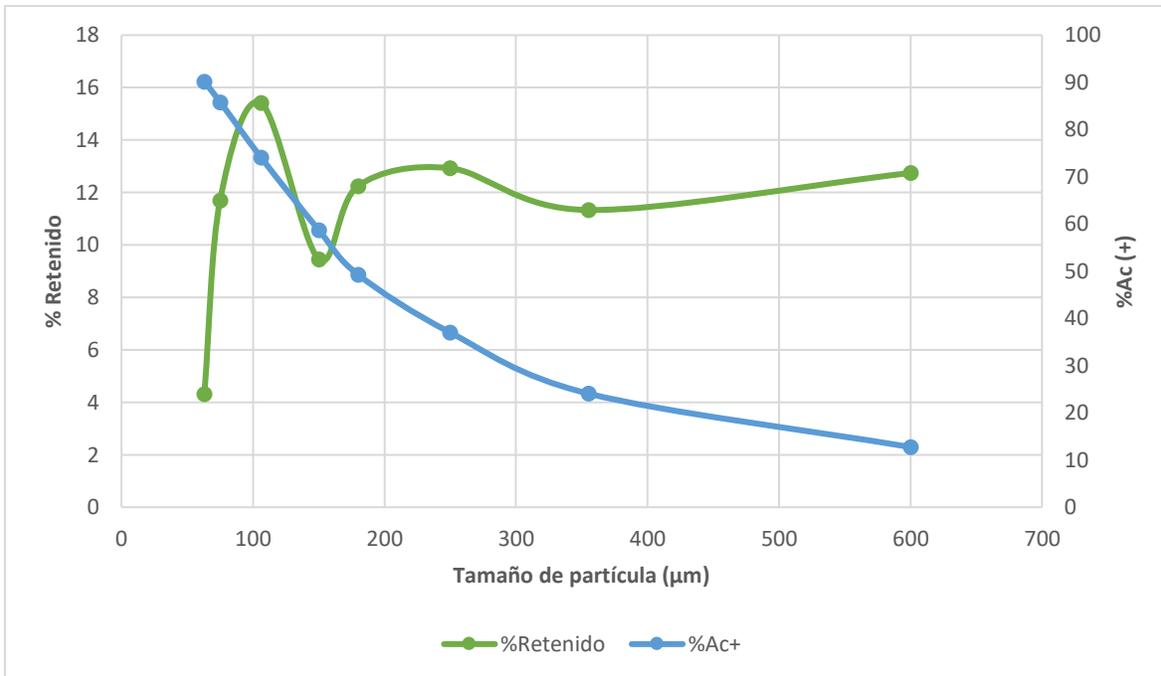


Figura 25. Distribución de tamaño de polvos de atomización.

La morfología de los polvos obtenidos por atomización con aire de las mallas 140 y 200 (tamaño utilizado para los demás procesos) se presenta en la figura 26. En general, las partículas son redondeadas y alargadas; esta forma es característica del proceso de atomización.

La forma de los polvos producidos por el proceso de molienda también es redondeada sin llegar a ser esférica (figura 27), ya que partimos de polvo de aluminio producido por atomización, pero estas partículas son menos alargadas debido a que durante el proceso de molienda el impacto del pistilo sobre el polvo hizo que se fracturaran y su tamaño disminuyera. La coloración también es más opaca por la presencia de SiC incrustado en la superficie del polvo.

El sobrecalentamiento de 290 °C se escoge debido a que esta temperatura, el metal fundido fluye sobre el crisol para atomizarse. A menor temperatura y con la presencia de SiC, el metal se vuelve pastoso, provocando que no haya fluidez y no se atomice; por el lado contrario, si se aumenta la temperatura, hay oxidación del metal fundido.

El diámetro de salida de 3/16" se escoge debido a que un menor diámetro impedía que el metal fundido saliera y a mayor diámetro, el metal pasaba a una velocidad que impedía que el impacto del flujo de aire lo atomizara.

El proceso de atomización del metal líquido produce gotas que se someten a cambios energéticos bruscos. La forma del polvo no es completamente esférica debido a la tensión superficial y velocidad de solidificación del material. La tensión superficial de los metales líquidos es alta y una gota una vez formada tiene a adoptar una forma esférica. Cuanto mayor es la viscosidad del medio de atomización, mayor será la deformación de la gota. Cuanto mayor es la velocidad de enfriamiento, más corto es el tiempo durante el cual la fuerza de tensión superficial puede esferoidizar la gota, por lo que queda una forma irregular de la partícula.

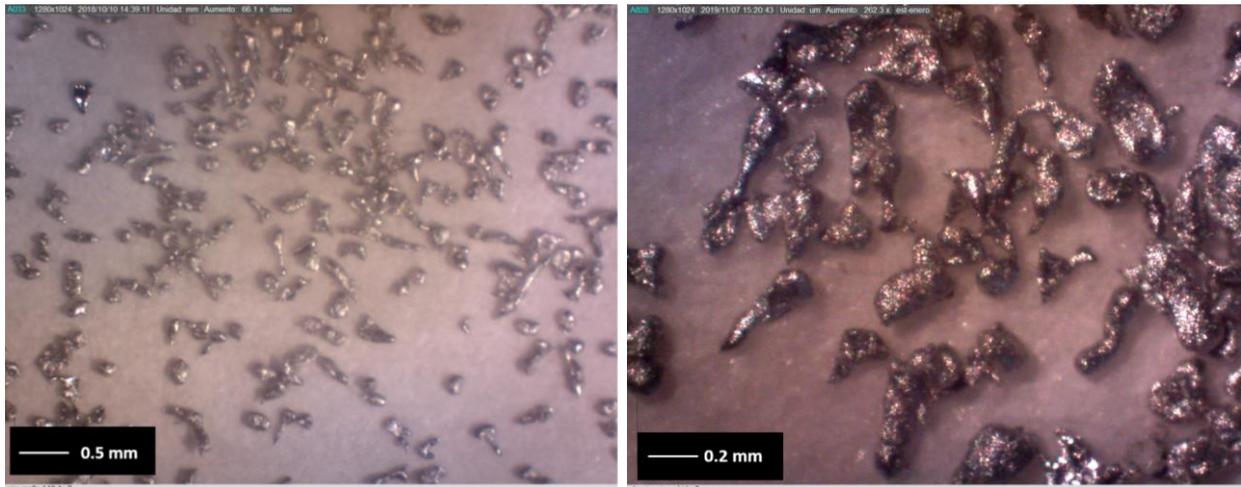


Figura 26. Forma del polvo del compuesto de Al-SiC obtenido por atomización con aire.

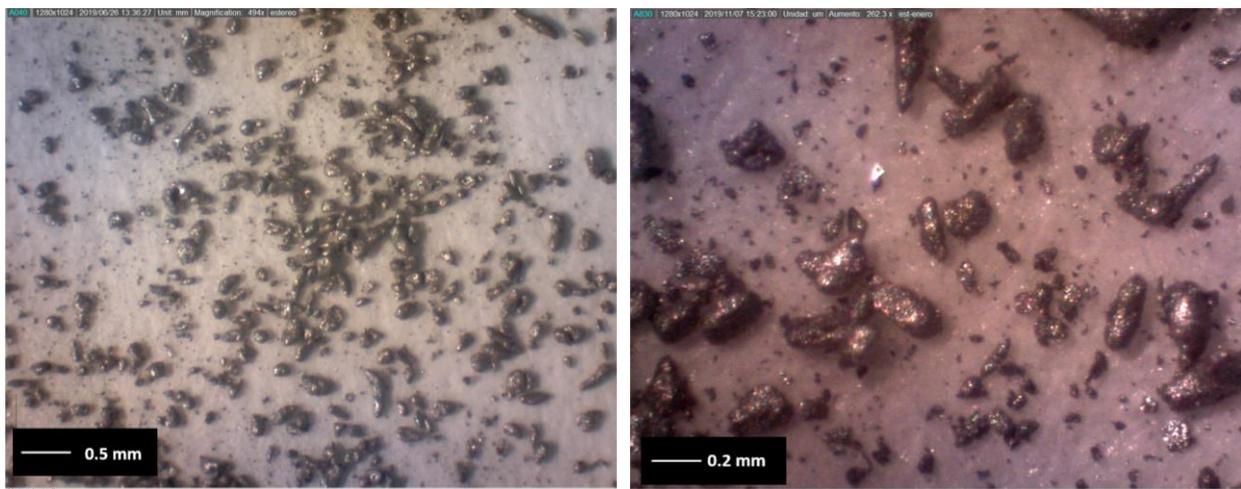


Figura 27. Forma del polvo de Al – SiC obtenido por molienda

En la figura 28 se presenta la microestructura de los polvos obtenidos, en la cual se observan dendritas. Durante el proceso de atomización el metal líquido presenta un subenfriamiento, provocando que las gotas atomizadas se encuentren a una temperatura menor a la de su punto de fusión; en este punto se inicia la nucleación y crecimiento de la fase sólida a partir de la superficie (la cual es la zona en recibir primero el impacto de aire). El crecimiento del sólido libera el calor latente a través de la interfase entre el sólido y el líquido, provocando la formación de dendritas que crecen en la dirección del flujo de calor.

Para el material compuesto obtenido por el proceso de atomización, se observa que las partículas de SiC se incorporaron en los polvos, mientras que, en los polvos utilizados para la obtención del material compuesto por molienda, solo se observa la partícula de la aleación de aluminio empleada, ya que las partículas de SiC se añadieron después.

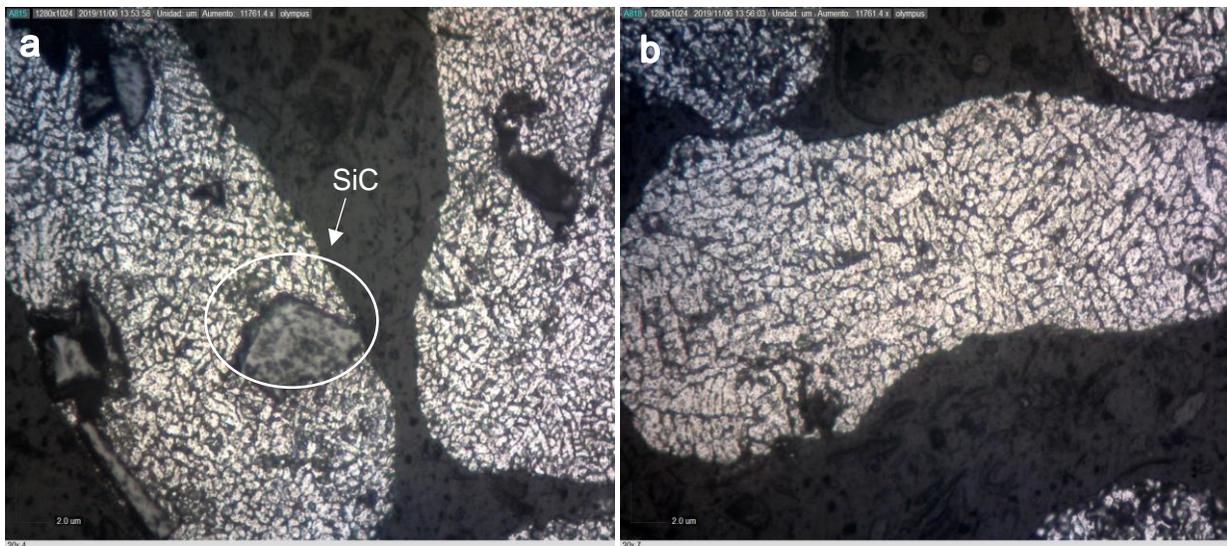


Figura 28. Microestructura de partículas de polvo a 20x del material compuesto obtenido por a) atomización, b) molienda.

En la tabla 7 se presentan los resultados de las mediciones de densidad relativa, aparente y velocidad de derrame.

La medición de la densidad relativa se hizo en relación con la densidad del alcohol, el cual es un líquido con densidad conocida, así como los valores conocidos de la masa del

alcohol y el polvo dentro del matraz, para poder obtener el volumen real del polvo, sin contar el aire que hay entre cada partícula, obteniendo un valor de densidad relativa.

La densidad aparente es la relación de una cantidad de masa de polvo seco y el volumen que ocupa, incluyendo poros y huecos. Esta medición se realiza llenando completamente de polvo metálico, que lleva cierto flujo, un contenedor de volumen conocido.

El valor del flujo o velocidad de derrame se obtuvo tomando el tiempo que tarda cierta cantidad de polvo seco en pasar a través de un orificio estandarizado. Este valor es necesario al momento de llenar la matriz para el proceso de compactación.

Tabla 7. Valores promedio de la densidad relativa, densidad aparente y flujo.

	$\rho$ relativa $\pm \sigma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ aparente $\pm \sigma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\dot{v} \pm \sigma$ (g/s)
Atomización	2.647 $\pm$ 0.095	1.105 $\pm$ 0.009	2.630 $\pm$ 0.067
Molienda	2.687 $\pm$ 0.081	1.199 $\pm$ 0.016	2.137 $\pm$ 0.060

La densidad relativa se determinó con la relación entre el peso específico de los polvos y el peso específico del alcohol, el cual fue la sustancia que se utilizó de referencia. Este valor es constante, o sea que no depende ni del tamaño, ni de la forma de los polvos, sino únicamente de la composición química. En este caso, el aluminio tiene un valor teórico de 2.7 g/cm<sup>3</sup> y, al añadir un 5% de carburo de silicio, el cual tiene una densidad de 3.23 g/cm<sup>3</sup>, se espera que el polvo producido tenga una densidad de 2.72 g/cm<sup>3</sup>. El resultado obtenido es un valor más bajo al teórico; esta variación se debe a la presencia de huecos llenos de aire que no son llenados completamente con alcohol a la hora de hacer las mediciones, teniendo un error en los pesos finales. A menor tamaño de partícula, más pequeños son los espacios de aire que hay entre cada una de ellas y es más difícil llenar dichos huecos. Sin embargo, con los valores obtenidos, los cuales son prácticamente constantes, se puede asegurar que la densidad es del aluminio principalmente. Los valores de densidad de molienda son mayores a los de atomización, lo que indica que probablemente haya una mayor cantidad de carburos en la matriz o una menor cantidad de poros.

## 4.2. Compactación y sinterización

Después de conocer las propiedades fundamentales y secundarias de los polvos se decidió trabajar con los tamaños de partícula de las mallas 140 y 200 para tener un mejor control en la porosidad. Se realiza el proceso de compactación por matrices relacionando la densidad relativa y la densidad aparente para obtener la masa necesaria para llenar de polvo la matriz y tener como resultado final probetas cilíndricas de una altura aproximada de 5 mm; se aplica una carga de 8.5 ton para obtener una alta densidad en verde sin sobrepasar el límite elástico, evitando que las piezas se fracturen por un exceso de deformación.

El proceso de sinterización se realiza a una temperatura de  $2/3$  la temperatura de fusión del aluminio, por un tiempo de dos horas con base en lo reportado en la literatura [1,8]. La atmósfera de argón se utiliza para evitar la oxidación del aluminio y para que la transferencia de calor fuera homogénea en toda la pieza. Como resultado de este proceso, se obtuvieron las probetas presentadas en la figura 29, las cuales se utilizaron para las pruebas de desgaste.

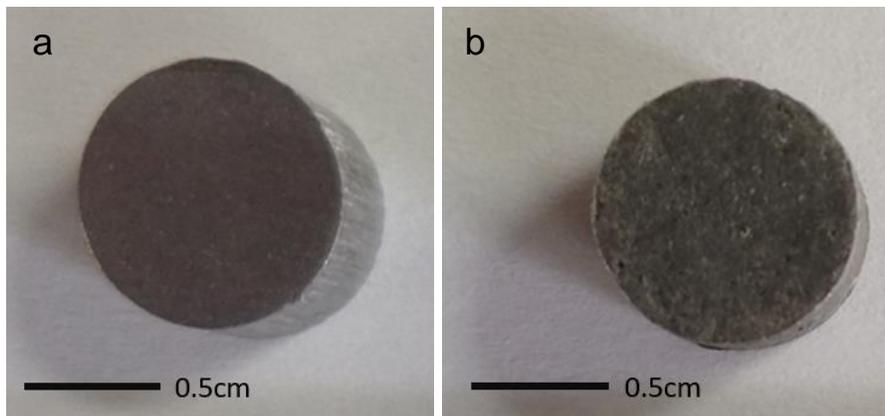


Figura 29. Probetas compactadas y sinterizadas del material compuesto de aleación Al-SiC al 5% vol. obtenidas por a) atomización, b) molienda.

Los factores más importantes involucrados en el proceso de sinterización son la temperatura, el tiempo y la atmósfera del horno. La fuerza impulsora en este proceso es el exceso de energía libre que tiene la superficie de los polvos, sin embargo, este proceso conlleva un conjunto de condiciones de sinterización con distintos mecanismos de

transporte de materia. Al incrementar la temperatura de sinterización, también se incrementan la velocidad y la magnitud de los cambios que se dan en el proceso, dando como resultado el fenómeno de transporte de masa desde el interior de las partículas hasta los cuellos formados previamente. El tiempo fue de dos horas, aunque el grado de sinterización aumenta con el tiempo, el efecto es pequeño en comparación con la dependencia de la temperatura [8]. Se usa una atmósfera inerte de argón para proteger contra la oxidación a los polvos metálicos, además de que este gas fue el encargado de la transferencia de calor hacia la pieza; por esta razón el tubo de cobre se instala alrededor del tubo de acero, permitiendo que al haber contacto del argón con la pieza, éste ya esté a la temperatura necesaria para que ocurra la sinterización [21].

### 4.3. Microscopía óptica

Con el fin de observar la estructura de las probetas sinterizadas, se cortaron transversalmente las probetas cilíndricas, a las cuales se les realizó preparación metalográfica. En la figura 30 se muestran las microestructuras obtenidas por los dos métodos estudiados. En la superficie de ambos materiales hay presencia de SiC, pero hay una mejor distribución en la probeta de polvo obtenido por el proceso molienda, en comparación con la probeta de polvo obtenida por atomización, esto sucede porque en el proceso de molienda, las partículas de SiC se van incrustando en la superficie del polvo de aluminio con forme se van combinando ambos materiales, mientras que en el proceso de atomización se tiene la dificultad de que al momento de tener el aluminio fundido, las partículas de SiC se van a la superficie del líquido debido a la falta de humectación, además de que no se puede controlar la cantidad de partículas que se adhieren a los polvos de aluminio al momento de la atomización.

En la microestructura de la pieza de polvos obtenidos por atomización hay presencia de cuellos entre partículas y poros, donde aún se pueden visualizar partículas de forma individual. La microestructura de la pieza de polvos obtenidos por molienda presenta poca porosidad y pérdida de identidad de las partículas, por lo que se tuvo una mejor densificación del material, lo cual concuerda con los valores de densidad de sinterización de las piezas.

La diferencia de las microestructuras de las piezas de material compuesto formado por polvos obtenidos por los dos métodos de obtención estudiados, a pesar de que las condiciones de sinterización fueron las mismas, se da porque el material compuesto obtenido por molienda tiene una mayor acumulación de energía debido a la deformación a la que se sometieron los polvos durante el proceso de obtención, la cual se aprovecha en el proceso de sinterización, dando como resultado mayor difusión de los elementos presentes en el material compuesto.

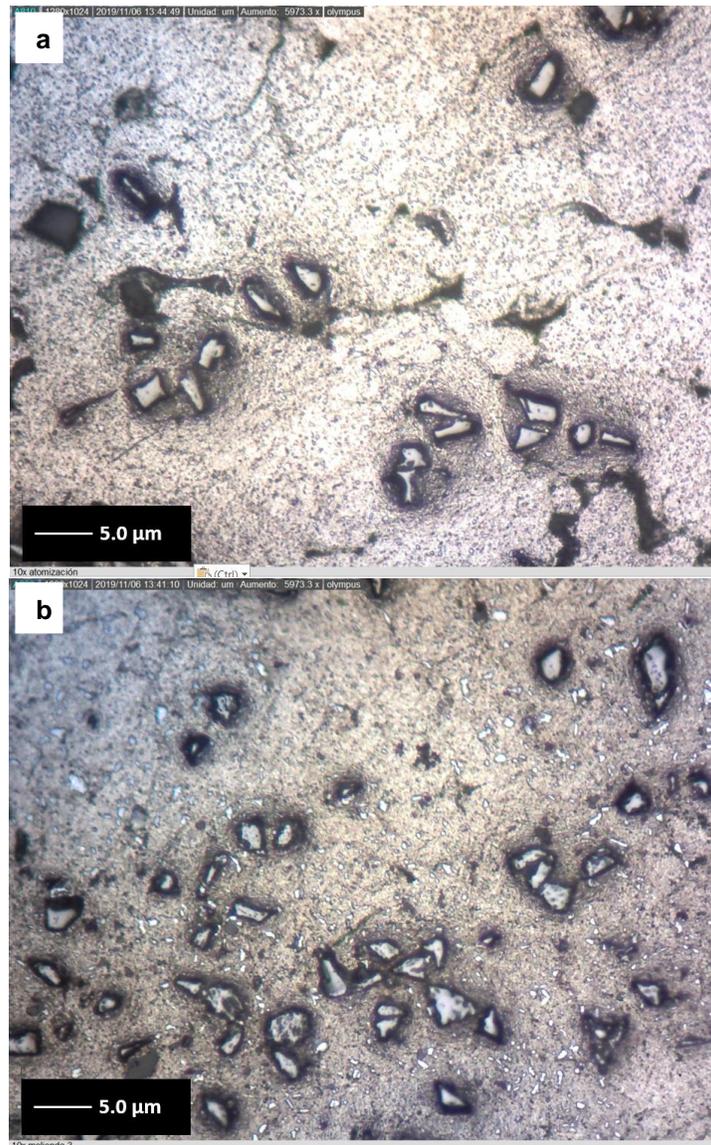


Figura 30. Microestructura del compuesto de Al- SiC obtenido por a) atomización, b) molienda a 10x.

Una vez que las probetas fueron compactadas y sinterizadas, se midió la altura y se pesó la masa de cada una; relacionando estos valores, se obtuvo la densidad de sinterización para ambos materiales (tabla 8), con la cual se determinó el porcentaje de porosidad presente en las piezas, tomando como base la densidad relativa de los polvos.

Tabla 8. Densidad y porcentaje de porosidad de las probetas sinterizadas.

	$\rho_{\text{sint}} \pm \sigma$ (g/cm <sup>3</sup> )	% Porosidad
Atomización	2.613 ± 0.039	3.222
Molienda	2.641 ± 0.038	2.296

#### 4.4. Conteo de partículas

Para determinar la distribución de las partículas de SiC dentro de la matriz de aluminio, se capturaron fotografías, las cuales se seccionaron en cuatro partes iguales y, con base en la escala de la fotografía, se determinó que el área de cada sección en la imagen es de 24.88 mm<sup>2</sup>. En cada sección se realiza el conteo de partículas incrustadas en la superficie de la pieza para obtener un promedio con su desviación estándar. Los resultados del número de partículas se presentan en la tabla 9, en donde la desviación estándar indica qué tan dispersos están los datos con respecto al valor promedio; a mayor desviación estándar, menor homogeneidad en la distribución de partículas dentro de la matriz. El número de carburos presentes en la matriz indica la densidad de partículas que tiene el material compuesto. A mayor número de partículas, mayor densidad.

Las probetas del material compuesto obtenidas por atomización tienen una distribución poco homogénea y un nivel de reforzamiento, en comparación con los resultados de las probetas del material compuesto obtenido por molienda.

Tabla 9. Promedio del número de partículas presentes en un área de 24.88mm<sup>2</sup>.

	No de partículas ± $\sigma$
Atomización	9 ± 3.700
Molienda	13 ± 1.708

La distribución de las partículas de carburo de silicio dentro de la matriz de aluminio influye en las propiedades del material compuesto obtenido porque si se tiene una distribución homogénea, las propiedades del material compuesto serán isotrópicas, es decir que serán las mismas sin importar la dirección en la que se aplican los esfuerzos.

En el proceso de atomización, las partículas de SiC son insolubles en el aluminio en estado líquido, por lo que las partículas no van a poder distribuirse por el metal líquido, sino que se irán al fondo del crisol debido que su densidad es mayor, habiendo pérdida de SiC; como consecuencia, la distribución de las partículas de carburo en los polvos del material compuesto no es homogénea; hay zonas en la matriz donde hay agrupamientos de carburos y hay zonas con poca presencia de éstos.

En el proceso de molienda, el polvo de aluminio y las partículas de carburo de silicio se van mezclando, provocando una mejor distribución de partículas en la matriz; por esta razón, las probetas obtenidas por polvo de molienda presentan homogeneidad en la distribución de partículas.

#### 4.5. Análisis por microscopía electrónica

Por medio de señal de electrones retrodispersados que da información sobre la composición química del material relacionando tonalidad con la densidad de los elementos, se analizaron zonas de la superficie preparada metalográficamente de las piezas de polvos obtenidas por atomización y molienda, realizando análisis químicos semicuantitativos, lineales y puntuales, además de mapeos de zonas de interés.

##### 4.5.1. Atomización

En la figura 30a se presenta la matriz de superficie de la probeta de polvos de atomización, en la cual se observa la presencia de poros y cuellos entre partículas, lo que indica que las condiciones de sinterización no fueron óptimas para obtener una pieza densa en donde las partículas pierden su identidad. Las figuras 30c y 30d son las zonas de interés que muestran un segundo microconstituyente de aspecto brillante en comparación con la matriz y el carburo que fueron utilizados para realizar microanálisis,

respectivamente. Se observan diferentes microconstituyentes en la solución sólida de aluminio que migraron a los límites de grano, las cuales se presentan de una colocación más blanca a la matriz, lo cual indica que se trata microconstituyentes de diferente densidad que se forman debido a que la solubilidad de estos elementos tiende a disminuir durante el proceso de solidificación (figura 30b).

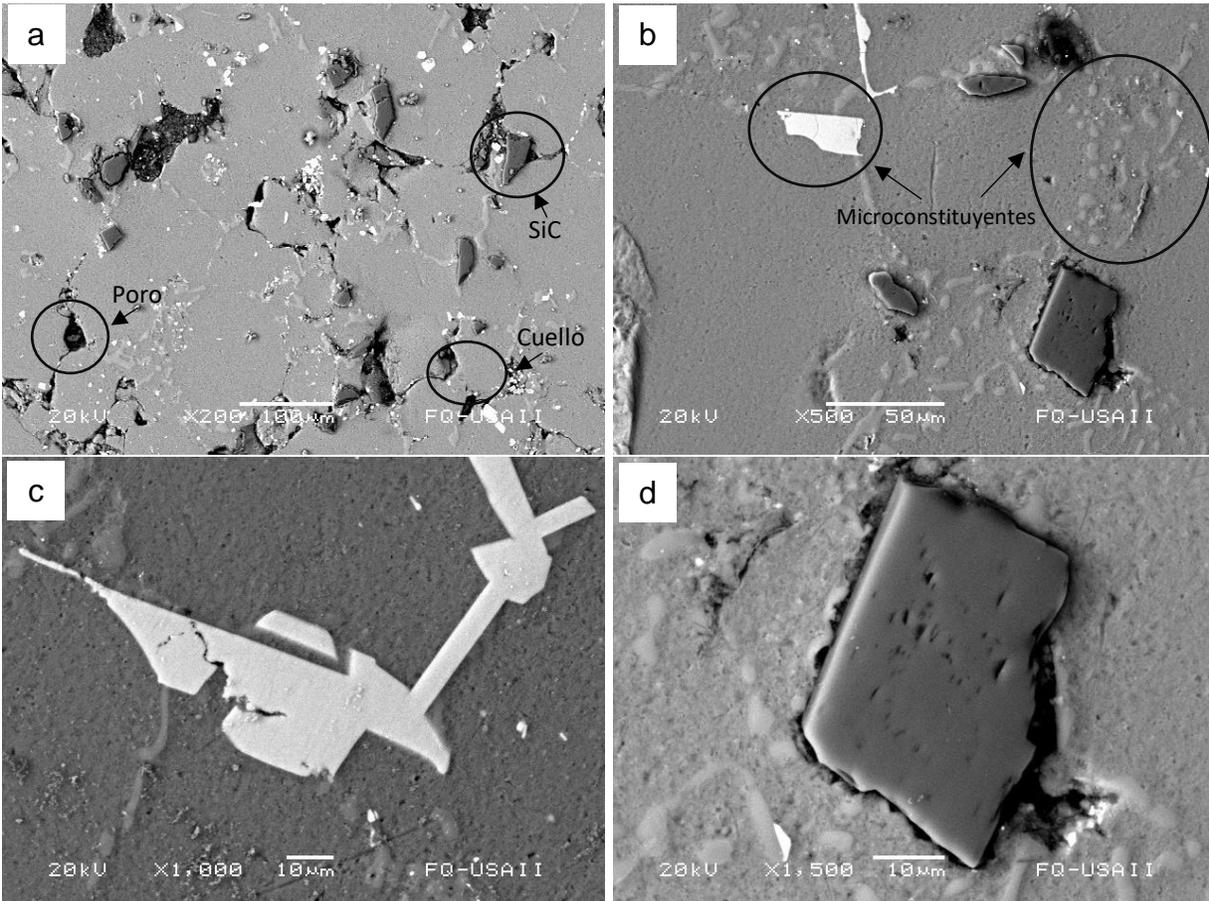


Figura 31. Microestructura del compuesto de Al-Si obtenido por atomización en donde hay a) presencia de poros, b) microconstituyentes en límites de partícula, c) microconstituyente de coloración blanca, d) partícula de SiC.

Se realiza un mapeo en la superficie del material para obtener resultados de la distribución de los elementos principales que hay dentro de una zona donde se identificó un agrupamiento de partículas de SiC, además de la presencia de microconstituyentes dentro de la matriz de la aleación de aluminio. La distribución de los elementos se presenta en la figura 32, en la cual se evidencia que se tiene una matriz metálica de una solución sólida de aluminio ( $\alpha Al$ ) con zinc y cobre como elementos aleantes los cuales

se añaden para incrementar propiedades mecánicas, los cuales se presentan de azul y verde, respectivamente. Dentro de la matriz se encuentran partículas de forma angular que muestran una coloración roja y amarilla, que indican la presencia de silicio y carbono, por lo que se trata del material de refuerzo de carburo de silicio. Las zonas más brillantes de la superficie tienen un color anaranjado en el mapeo, el cual representa al hierro [34].

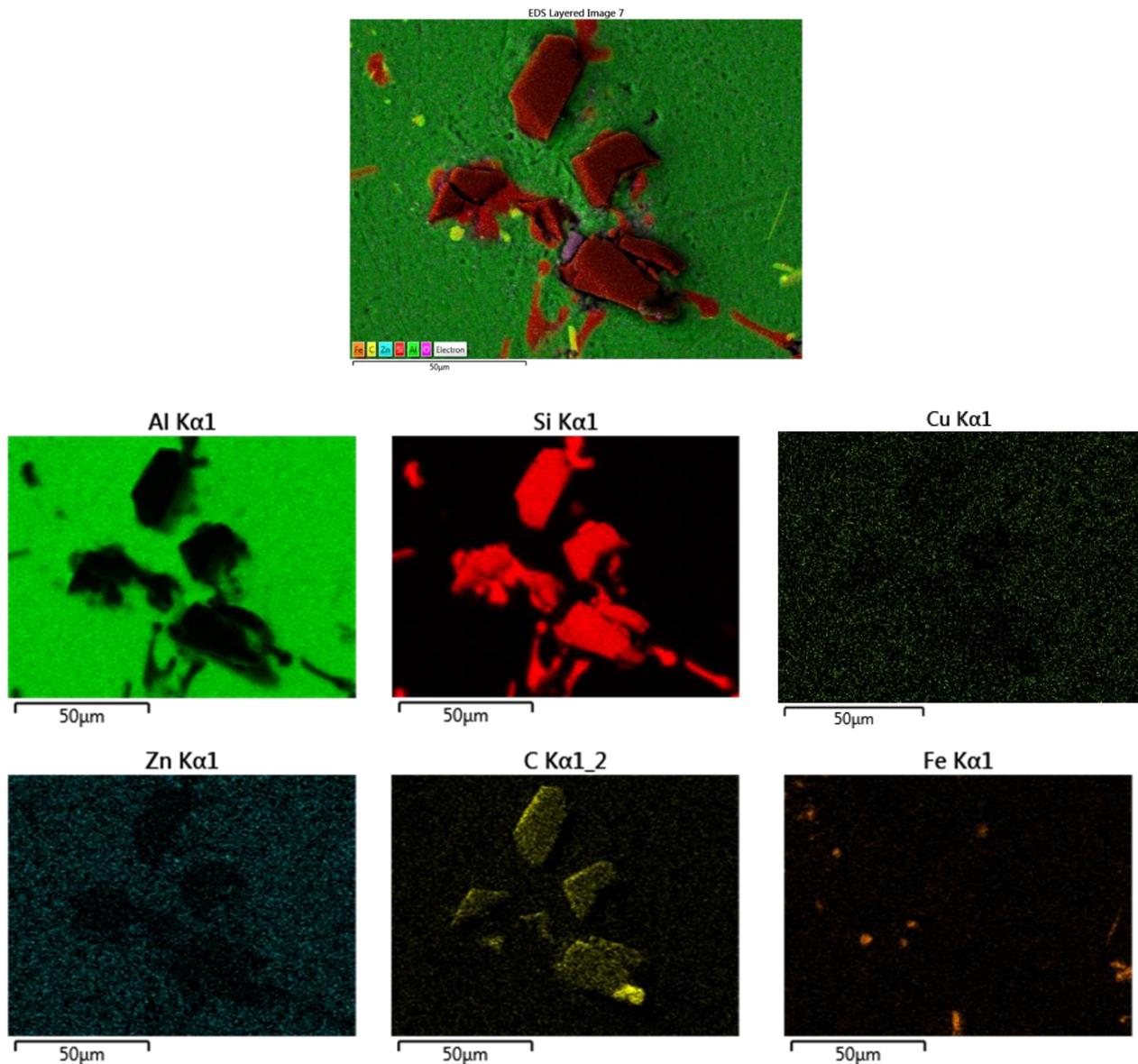


Figura 32. Mapeo composicional obtenido por microanálisis de distintos elementos en una zona representativa con presencia de carburos de silicio en la matriz de atomización.

Se hace un análisis semicuantitativo en la matriz de la solución sólida de aluminio y en una zona más brillante que da como resultado la presencia de hierro y aluminio, principalmente, lo que indica la formación de un segundo microconstituyente de aluminio – hierro.

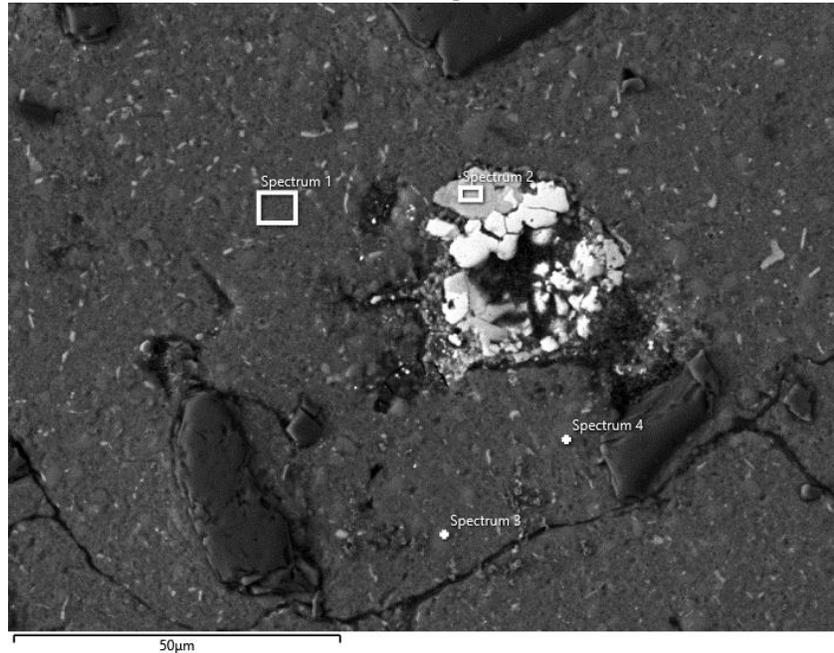
La presencia de hierro en los polvos es esperada debido al tipo de aleación empleada y se considera una impureza. El hierro es soluble en aluminio en estado líquido, pero esto va disminuyendo conforme la temperatura baja; por lo tanto, durante la solidificación existe una fuerza impulsora para la formación de compuestos intermetálico rico en hierro que contiene aluminio y otros elementos aleantes. La poca solubilidad del Fe en Al en estado sólido y la velocidad de solidificación provocan que la fase se retenga [35,36].

La presencia de un compuesto intermetálico dentro de las probetas provoca una disminución en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio, ya que la vuelve frágil y reduce su ductilidad.

Para una aleación A356 con altos contenidos de Si y otros elementos aleantes que, en conjunto con el hierro forman fases complejas, que se caracterizan con diagramas de fases ternarios o cuaternarios y con base en los resultados de los análisis de la figura 33, el intermetálico está compuesto por Al, Fe y Si, lo cual indica que se trata del compuesto  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi [7, 37]. Que el intermetálico no esté disperso en la matriz puede provocar disminución de las propiedades mecánicas, haciendo al material anisotrópico.

Al microconstituyente de forma angular y disperso en los límites de granos de las partículas, se le realizan análisis puntuales, obteniendo presencia de silicio y aluminio (figura 33), esto significa la formación del eutéctico de Al – Si, el cual está formado por dos fases sólidas, una es la solución sólida  $\alpha$  Al y la segunda es una fase rica en silicio “ $\beta$ ”.

Electron Image 153



Spectrum 1			Spectrum 2			Spectrum 3			Spectrum 4		
	Wt%	$\sigma$									
Al	79.0	0.3	Al	51.2	0.3	Si	65.6	0.3	Al	46.1	0.2
Si	6.4	0.1	Fe	19.2	0.2	Al	25.5	0.2	Si	42.3	0.2
Zn	3.7	0.1	Si	8.2	0.1	Zn	1.0	0.1	Zn	2.3	0.1

Figura 33. Espectros de microanálisis en, matriz metálica, intermetálico y eutéctico.

En la unión de la matriz metálica con las partículas de carburo de silicio se realiza un análisis lineal, el cual empieza en la matriz, cruza una partícula de carburo y termina en la matriz (figura 34); el color violeta representa el análisis de aluminio, el cual disminuye cuando la trayectoria cruza el carburo de silicio; el espectro de color amarillo representa la presencia de silicio, el cual tiene un comportamiento contrario al aluminio; al inicio de la trayectoria, no hay presencia de silicio, pero éste aumenta al momento de que la trayectoria cruza la partícula. Estos cambios de concentración indican la insolubilidad de las partículas, lo que indica que debe de haber un material de unión que forme una interfase y una a ambos elementos, la cual es una fase distinta donde los esfuerzos son transmitidos entre el reforzamiento y la matriz.

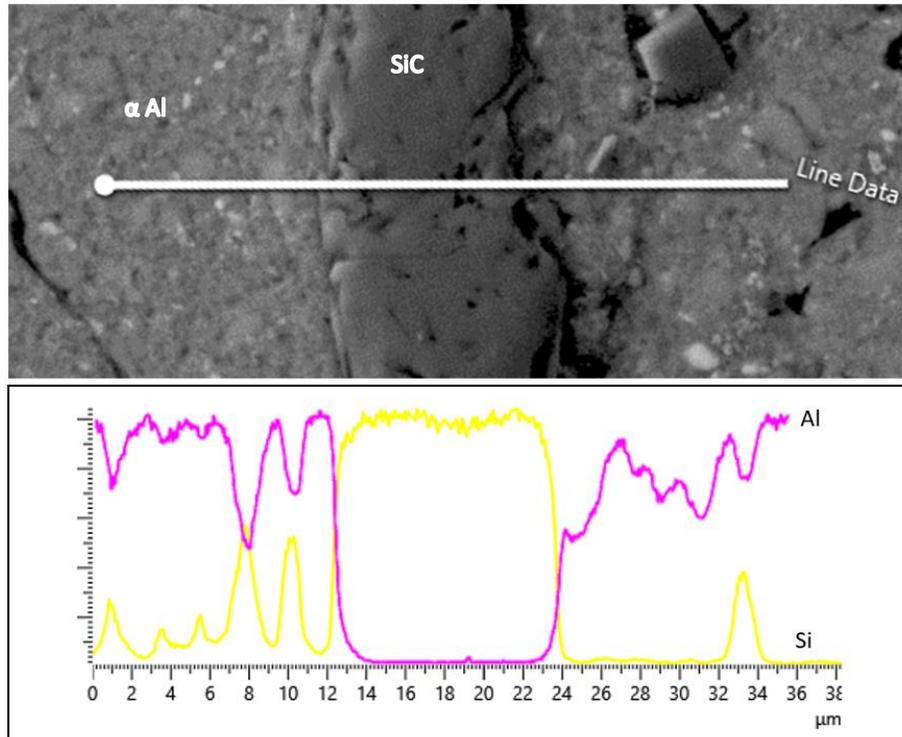


Figura 34. Microanálisis lineal de una partícula de SiC dentro de una matriz metálica de aluminio. De color amarillo la presencia de silicio y de color violeta la del aluminio.

En la figura 35 se presentan los resultados de un análisis lineal de la intercara del compuesto formado por aluminio y SiC. De color anaranjado se muestra la trayectoria del magnesio, la cual presenta un pico justo en el límite de la matriz con el carburo, indicando la presencia de una interfase que sirve como un enlace entre el aluminio y el SiC.

En la pieza del material compuesto obtenido por atomización, el magnesio es el elemento que liga las partículas de carburo con la matriz de aluminio. Esta interfase es una unión química que se crea al momento de tener al material compuesto en estado líquido, en donde el magnesio humecta las partículas de silicio, lo que significa que se expande por la superficie del SiC desplazando todo el aire que hay entre la aleación de aluminio y la partícula debido a su insolubilidad provocando que las partículas puedan unirse al aluminio en el proceso de atomización. Esta es una unión química que se da ya que el magnesio es compatible con la matriz y las partículas de SiC.

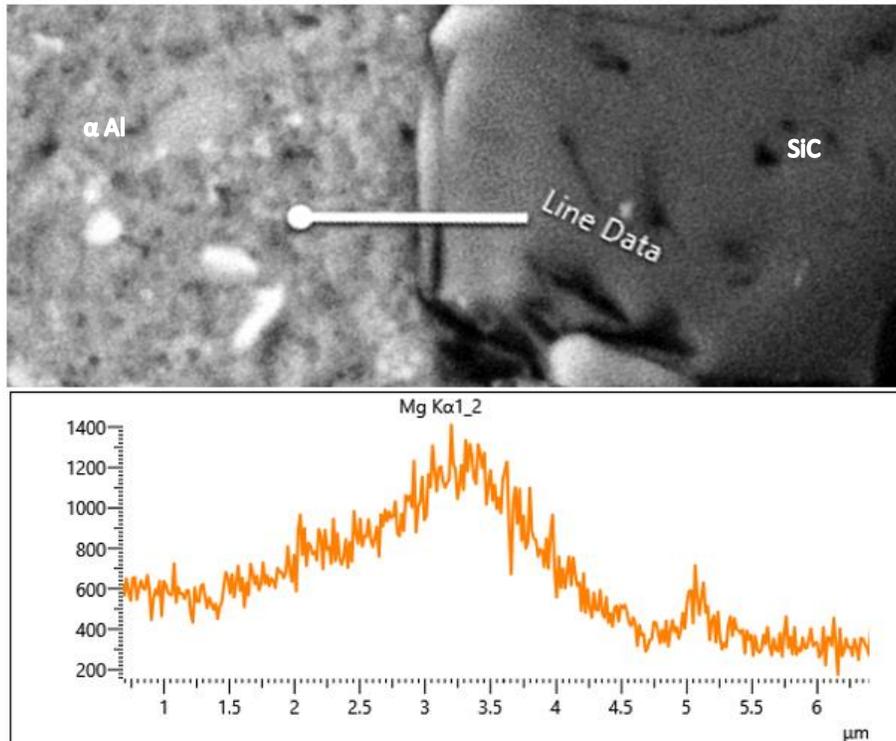


Figura 35. Microanálisis lineal de la interfase entre la matriz y la partícula de carburo de silicio.

Sin la existencia de una interfase, la unión entre el refuerzo y la matriz es débil y al aplicar una fuerza sobre el material compuesto, las partículas reforzantes se desprenden, haciendo que la matriz sea la que recibe todo el esfuerzo, dando como resultado que la incorporación de partículas de refuerzo sea en vano. Al haber una interfase entre estos dos componentes como el magnesio, ésta se encargará de unir a las partículas con la matriz y de transmitir el esfuerzo de la matriz hacia la partícula de refuerzo.

#### 4.5.2. Molienda

La superficie del compuesto obtenido por molienda se presenta en la figura 36, en la cual se observa que las partículas perdieron su identidad, consolidando una pieza con poca porosidad. Un microconstituyente brillante está en los límites de partículas y en la unión entre la matriz y el carburo de silicio; esto, con base en los análisis realizados en el material de polvos obtenidos por atomización, puede tratarse de hierro. De una coloración gris clara, se observa un constituyente con forma angular disperso en la matriz de manera homogénea.

El cambio de la estructura entre la superficie de la pieza de polvos obtenidos por atomización y la pieza de polvos de molienda se debe a que dos factores. El primer factor es que al moler el material, se van haciendo partículas más pequeñas de polvo, las cuales se van mezclando y dispersando. El segundo factor es a que en el proceso de molienda se fueron deformando las partículas, lo cual hizo que la energía de activación de las partículas se incrementara y se aprovechara en el proceso de sinterización, haciendo que los elementos tuvieran mayor difusión.

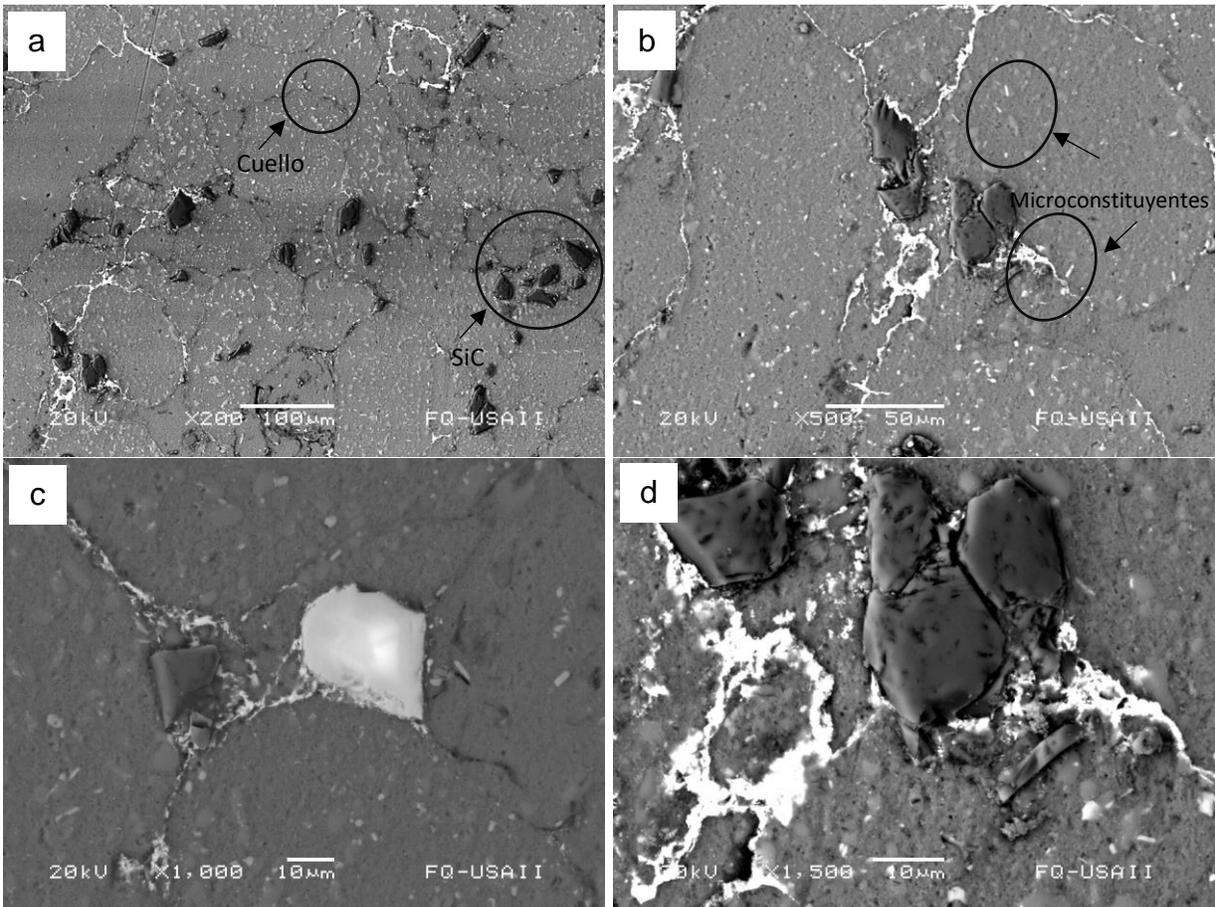


Figura 36. Microestructura del compuesto de Al-Si obtenido por molienda en donde se aprecia a) matriz sinterizada de aleación de Al con partículas de SiC, b) partículas de SiC rodeadas de segundos microconstituyentes en los límites de partículas, c) microconstituyente de distinta densidad a la matriz, d) partículas de SiC.

Se realiza un mapeo en la superficie de la probeta de polvos obtenidos por molienda (figura 37) en donde se aprecia la presencia de los elementos de Cu y Zn de color azul y verde, respectivamente, los cuales disueltos en la matriz de  $\alpha$  Al como elementos

aleantes. Se observa una zona rica en zinc presente en los límites de partículas del material compuesto. Las partículas angulares dispersas en la matriz presentan un color violeta y rojo; estos colores muestran la presencia de Si y C, respectivamente, por lo que dichas partículas son los carburos de silicio agregados a la matriz de aluminio como material de refuerzo. La zona brillante presenta un color anaranjado, que indica la presencia de hierro disperso en la matriz, con acumulaciones en límites de partículas.

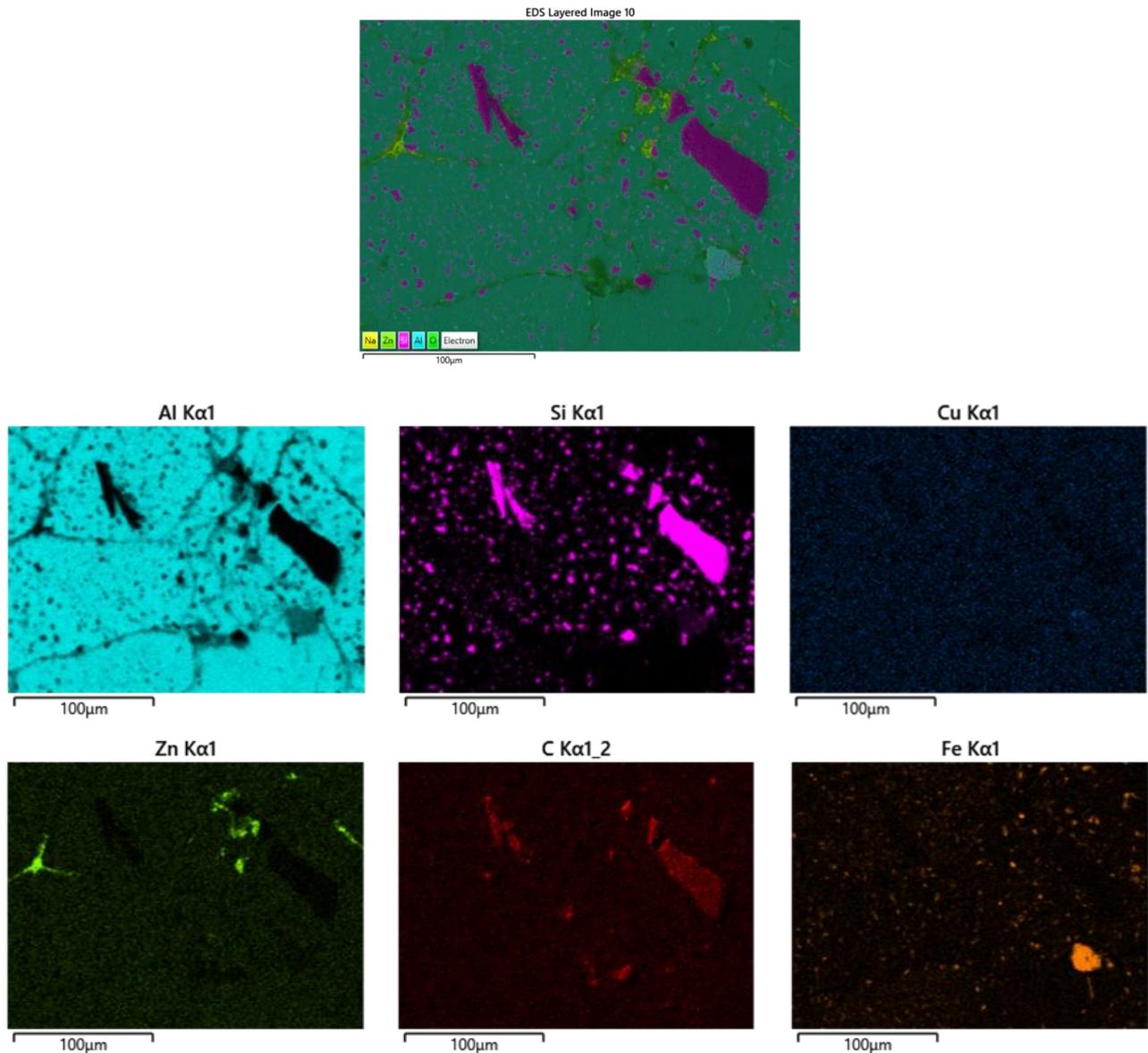


Figura 37. Mapeo composicional obtenido por microanálisis de distintos elementos en una zona representativa con presencia de carburos de silicio en la matriz de molienda.

Los análisis puntuales se realizan en las zonas que presentan un cambio de coloración en comparación con la matriz, dando como resultado un microconstituyente con hierro que corresponde al intermetálico y un microconstituyente rico en silicio, el cual es el eutéctico (figura 38). Con base en los resultados del espectro 5, los elementos que constituyen al compuesto intermetálico son Al, Fe y Mg, lo que corresponde a la formación del  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ , como en el caso de atomización. A pesar de que la presencia de este intermetálico afecta las propiedades del material compuesto, el que esté disperso en la matriz hace que se vuelva más isotrópico.

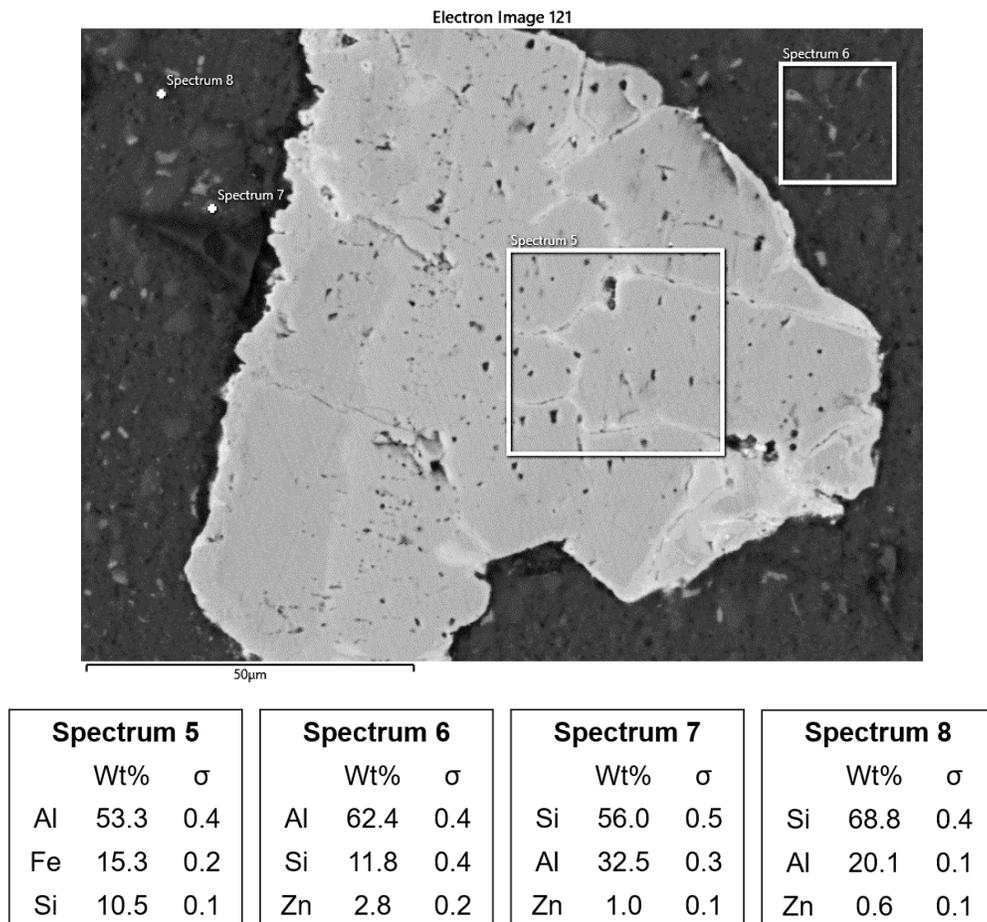


Figura 38. Espectros de microanálisis en a) matriz metálica, b), c) compuesto intermetálico, d) eutéctico.

Para caracterizar las partículas de carburo incrustadas en la superficie de los polvos de aluminio, se realiza un análisis lineal, el cual cruza una partícula de silicio. El color azul representa el aluminio, el cual está presente durante el análisis de la trayectoria en la matriz y disminuye al cruzar la partícula de carburo. El silicio es representado por el color

violeta y tiene un comportamiento contrario al aluminio y aumenta al momento de analizar la partícula (figura 39).

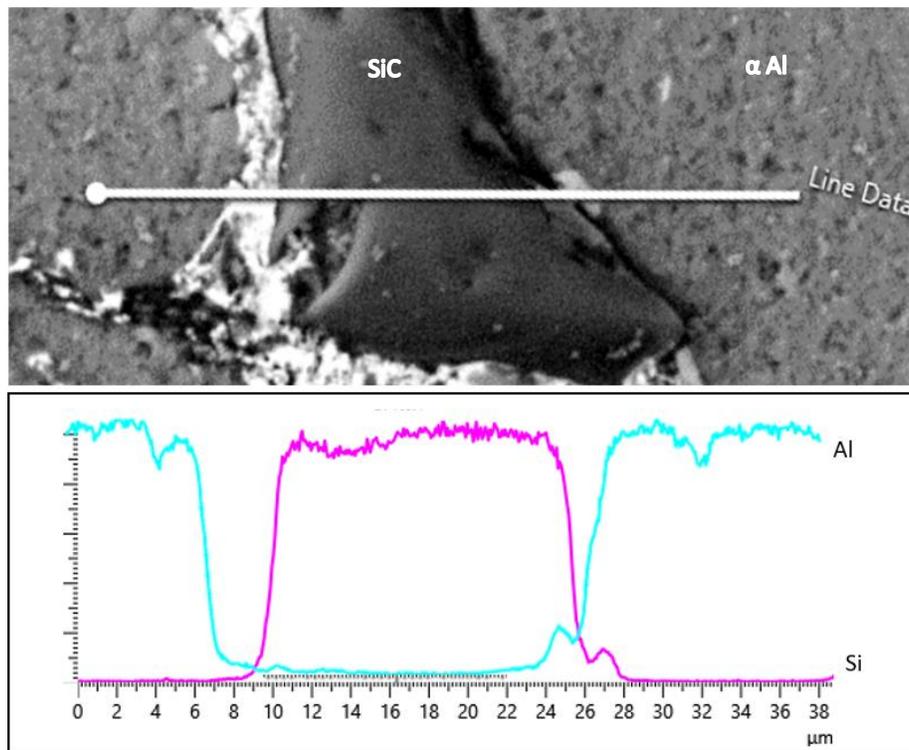


Figura 39. Microanálisis lineal de una partícula de SiC dentro de la matriz metálica de aluminio. De color violeta la presencia de silicio y de color azul la presencia de aluminio.

Para analizar las zonas brillantes ubicadas entre los límites de partículas e interfases de la solución de Al – SiC, se realizan análisis semicuantitativos puntuales, obteniendo los resultados de la figura 40, que muestran zonas ricas en hierro, las cuales se refieren al compuesto intermetálico y zonas ricas en zinc, las cuales se forman debido a la difusión que hubo durante el proceso de sinterización; esto debido a los factores que influyen en el método de obtención de polvos por molienda.

En la figura 41 se observa la diferencia de contraste de los microconstituyentes de hierro y zinc, las cuales son semejantes debido a que los valores de densidad de ambos elementos son cercanos, pero teniendo mayor densidad el zinc. Se realizan análisis químicos para caracterizar los microconstituyentes presentes. Se observa que, la zona de mayor brillo es rica en zinc y la zona con menor brillo indica que es el intermetálico de hierro.

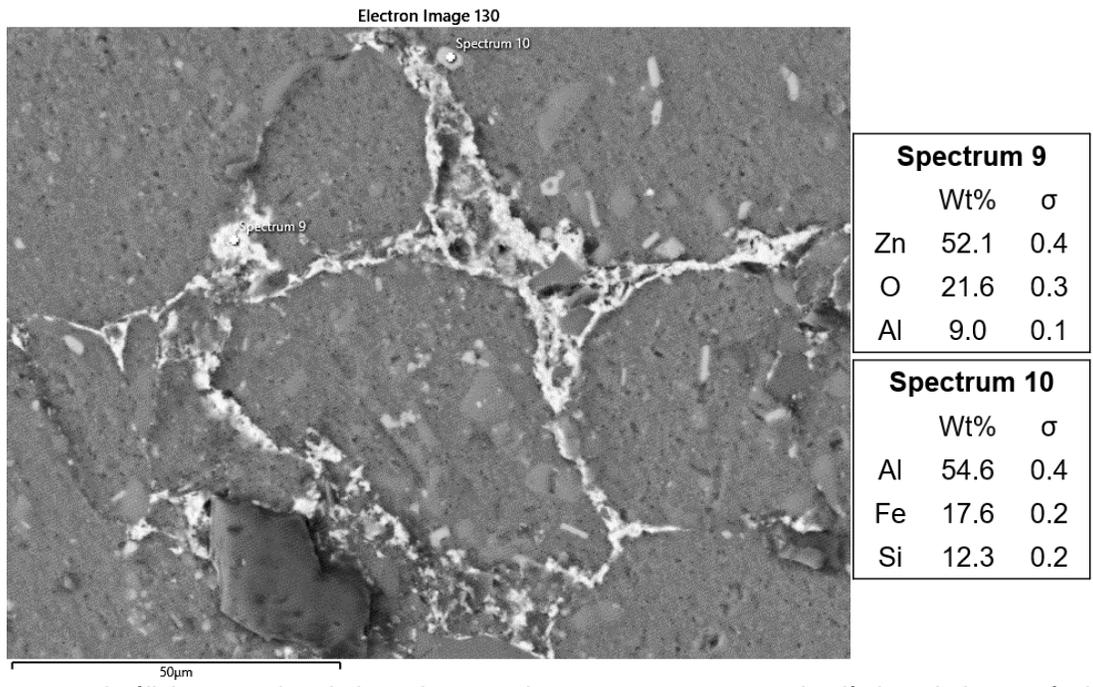


Figura 40. Análisis puntuales de los microconstituyentes presentes en los límites de las partículas.

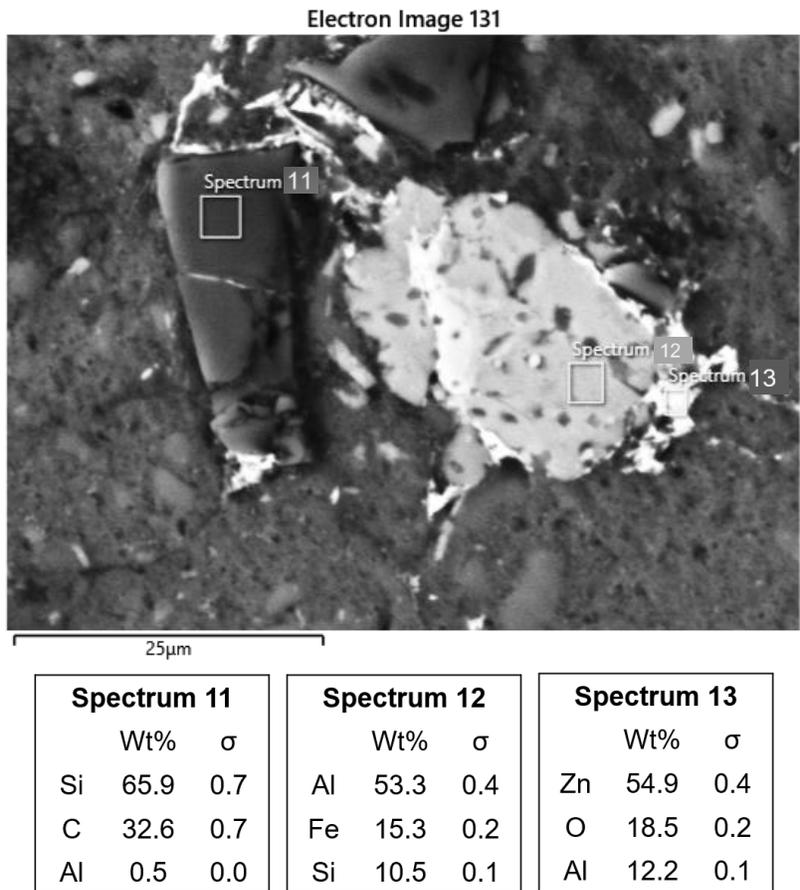


Figura 41. Análisis para la diferenciación de microconstituyentes de mayor densidad dentro de la matriz.

Las partículas de carburo de silicio son rodeadas por un microconstituyente brillante, creando una interfase que da unión entre la matriz y el carburo de silicio (figura 42), la cual se crea en el proceso de sinterización por medio de transporte de masa. Para caracterizar la interfase, se realiza un análisis lineal (figura 43), en donde el color amarillo representa la presencia de Zinc, el cual no tiene presencia al inicio del análisis, pero se va incrementando gradualmente, obteniendo un punto máximo localizado en la interfase y vuelve a disminuir al inicio de la partícula de carburo; este aumento gradual representa como el zinc fue difundiendo hasta los espacios que había entre la matriz y el carburo.

En el proceso de molienda, la unión entre la matriz y los carburos de silicio es mecánica; en esta unión hay un espacio entre ambos elementos, los cuales son ocupados por los elementos que difunden durante el proceso de sinterización. El zinc, el cual estaba disuelto en los polvos de la aleación de aluminio, tuvo la energía suficiente para difundir a los espacios entre la matriz y el carburo, uniéndolos y creando una interfase.

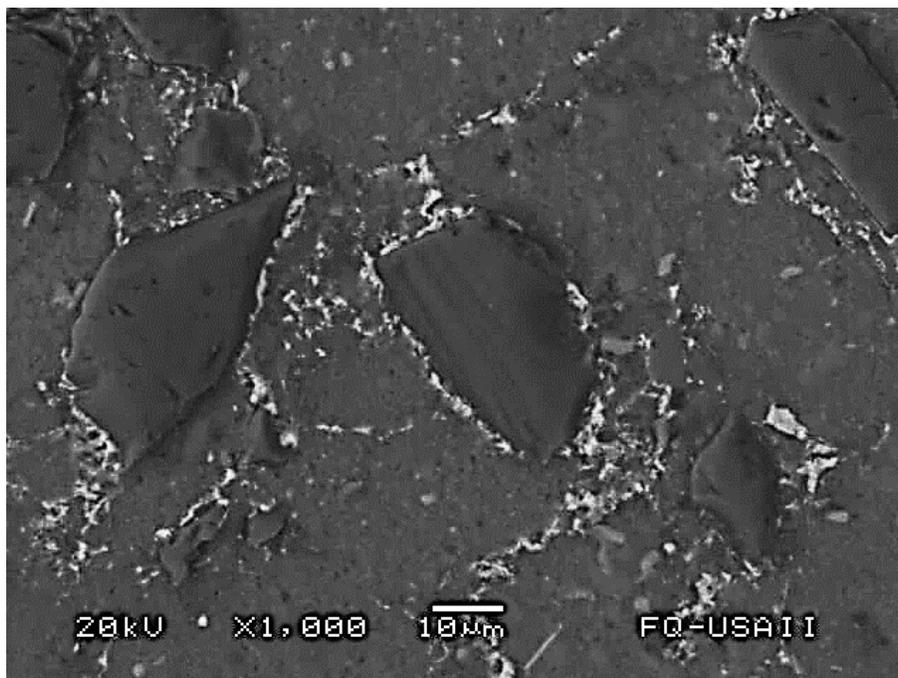


Figura 42. Partículas de SiC rodeadas de una interfase que las une a la matriz de aluminio.

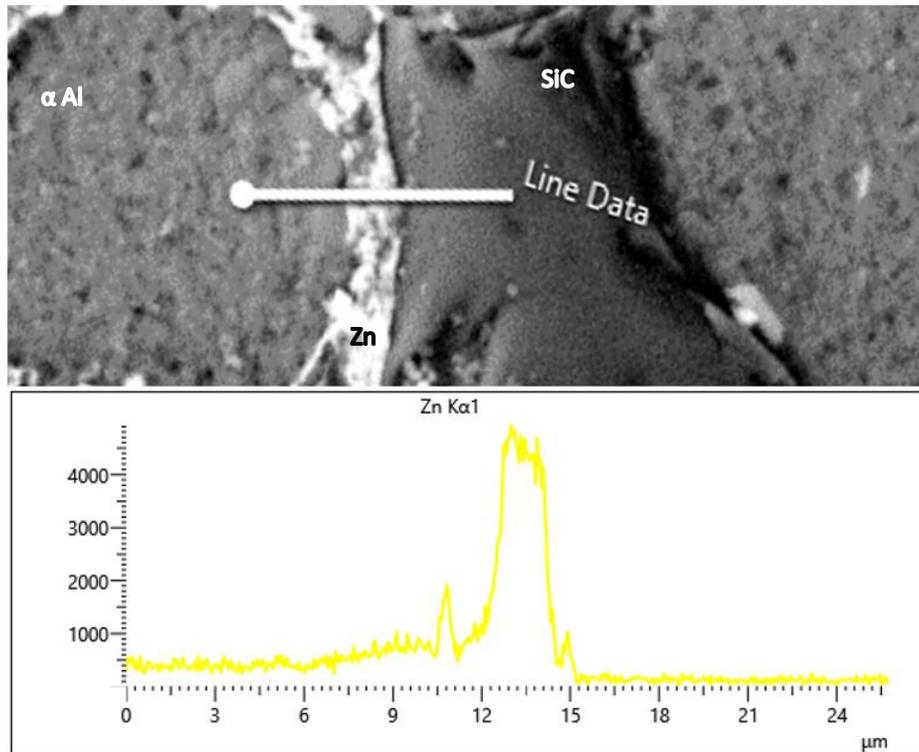


Figura 43. Análisis lineal de la interfase del material compuesto de molienda.

#### 4.6. Ensayo de desgaste

Las probetas de 10 mm de diámetro, previamente compactadas y sinterizadas, se colocaron de manera perpendicular a un rodillo en movimiento continuo a una velocidad de 250 rpm y soportando una carga de 2.720 Kg para realizar el ensayo de desgaste. En función de la distancia recorrida durante la prueba, se genera una pérdida de masa, la cual se reporta cada 15 minutos, para obtener las curvas de la figura 44 para la probeta de polvos obtenidos por atomización y molienda, respectivamente. En la tabla 10 se presentan los resultados del porcentaje de pérdida de masa de las probetas del material compuesto obtenido por atomización y molienda a determinados tiempos y distancias recorridas.

Tabla 10. Porcentaje de pérdida de masa del ensayo de desgaste con base en la distancia recorrida.

t (min)	d (km)	% Masa perdida	
		Atomización	Molienda
0	0.00	0.00	0.00
15	0.64	1.20	0.89
30	1.28	1.75	1.72
45	1.92	2.55	2.67
60	2.57	3.23	3.80
75	3.21	3.93	4.99
90	3.85	4.53	5.29
105	4.49	5.12	5.76
120	5.13	5.78	6.06
135	5.77	6.36	6.41
150	6.41	7.14	7.01
165	7.05	7.38	8.14
180	7.70	7.62	9.14
210	8.98	8.09	11.40
240	10.26	9.77	13.54

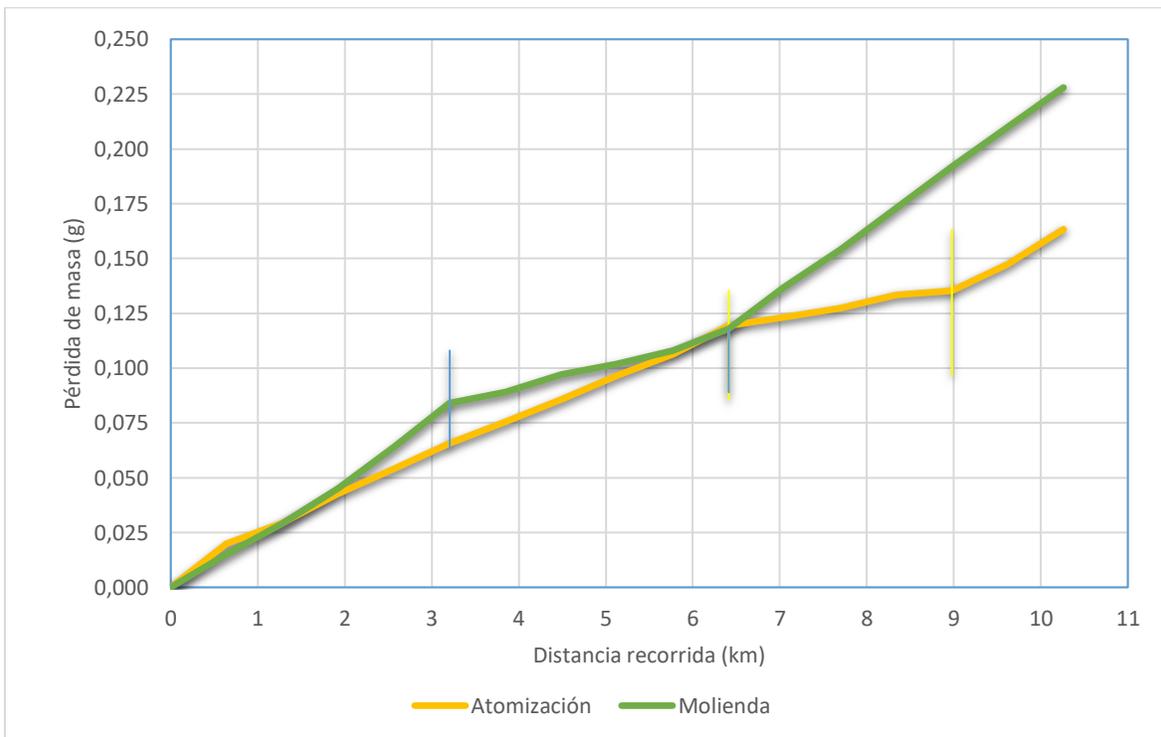


Figura 44. Pérdida de masa del material de polvos obtenidos por atomización y molienda en función de la distancia recorrida.

Al inicio del ensayo, las probetas tienen una superficie plana y el rodillo tiene una superficie curva, por lo que el rodillo no tiene contacto con el área total de la probeta, sino que se concentra en algunos puntos de contacto y en consecuencia se pierde masa rápidamente.

En el ensayo de desgaste de la pieza del material de polvos obtenidos por atomización, la primera etapa, clasificada como de asentamiento, se realiza en un tiempo de 2 h 30 min, en donde se calcula que se recorre una distancia de 6.4 km, este valor se obtiene con la relación del diámetro y la velocidad del rodillo. En esta etapa, se determina que el material de polvos de atomización tiene pérdida de 0.119 g, lo que equivale al 7.14% de la masa total de la pieza.

En la probeta del material compuesto obtenido por molienda, la etapa de asentamiento tiene una duración de 1 h 15 min, habiendo recorrido una distancia de 3.21 km, determinando que hubo una pérdida de 0.084 g, que es un 4.99% de la masa inicial de la pieza.

En la segunda etapa del proceso, la pérdida de masa en función de la distancia recorrida disminuye y se tiene un comportamiento lineal debido que el área de contacto de la pieza del material compuesto y el rodillo de acero aumenta. En la prueba de la pieza de polvos de atomización, esta etapa se desarrolló en un tiempo de 45 min, habiendo recorrido una distancia de 8.98 km, y obteniendo una pérdida del 8.09% del material total de la pieza.

La segunda etapa de la prueba de la pieza de material de polvos de molienda tiene una duración de 1h 15 min, en la cual se recorre una distancia de 6.41 km; en esta etapa, la pieza pierde el 7.01% de su masa inicial.

En esta etapa, la fricción entre el material compuesto y el rodillo genera calor, provocando que la superficie de la matriz del material comience a deformarse en forma de láminas delgadas que se empastan en la pieza, y generando auto lubricación del metal base; estas láminas también tienen la función de cubrir a las partículas de carburo, por lo cual la pérdida de masa disminuye y tiene un asentamiento.

Conforme el tiempo transcurre, las láminas se desprenden, arrastrando partículas y provocando el desprendimiento de las partículas reforzantes debido a la falta de unión con la matriz, teniendo un desgaste catastrófico del material.

En la tercera etapa se tiene un desgaste clasificado como catastrófico, en donde la pieza se va desgranando y la pérdida de masa se incrementa drásticamente. Al final de las pruebas, las piezas han recorrido una distancia de 10.26 km en un tiempo de 4 h, en donde la probeta del material compuesto de polvos de atomización tiene una pérdida de peso de 9.74% y la probeta del material compuesto de polvos de molienda presenta una pérdida del 13.5%.

El tipo de desgaste que sufrieron las piezas del material compuesto obtenido por molienda y atomización fue adhesivo, en donde el material compuesto de la aleación Al – SiC se somete a una carga y en contacto con el rodillo de acero en movimiento rotatorio va perdiendo masa. Este proceso sucede debido a que las superficies del rodillo y el material compuesto están en contacto; el deslizamiento del rodillo provoca que el material compuesto se deforme y posteriormente se desprenda.

Se presenta desgaste abrasivo al momento que la partícula de carburo de silicio se desprende de la matriz y queda atrapado entre el rodillo y la matriz, forzándolas a moverse a lo largo de la superficie, provocando daño y pérdida del aluminio.

#### 4.7. Ensayo de dureza

Con base en la norma ASTM E – 10, se realiza el ensayo de dureza Brinell a tres piezas de polvo obtenidas por atomización y a tres piezas de polvo obtenidas por molienda. Cumpliendo con la relación de  $P/D^2=5$  [7,31] se genera una huella en las probetas al momento de aplicar una carga sobre las probetas con un indentador de 5 mm de diámetro para obtener una huella a la cual se le mide el diámetro para calcular la dureza que se presenta en la tabla 11, la cual nos muestra que el material obtenido por el proceso de atomización tiene una mayor dureza al compararlo con el valor del material obtenido por el proceso de molienda. Esta diferencia se puede atribuir a que la densidad de partículas

de carburo de silicio es mayor en el material compuesto obtenido por molienda, además de presentar una distribución homogénea

Tabla 11. Resultados de dureza Brinell para ambos métodos de producción.

	<b>d<sub>prom</sub> (mm)</b>	<b>HBN<sub>prom</sub> ±σ</b>
Atomización	2.025	37.150 ± 0.029
Molienda	1.993	38.417 ± 0.035

La dureza de la pieza de polvos obtenidos por molienda es mayor debido a que hay una mayor densidad y mejor distribución de carburo de silicio, evitando la deformación plástica de la matriz. En general, un material más duro tiene mejor resistencia al desgaste, sin embargo, para materiales compuestos, el tipo de interfase matriz – partícula tiene mayor influencia debido a que de ésta depende la resistencia que tendrá la combinación de ambos componentes porque es la encargada de la transferencia de carga de la matriz a la partícula reforzante.

A pesar de que el material de molienda presenta mayor dureza y tiene el SiC dentro de la matriz con mejor distribución, no presenta mejores propiedades de desgaste porque no hay una buena unión matriz – partícula, haciendo que, al estar en contacto con otro material, las partículas de SiC se desprendan y no den el reforzamiento al aluminio que se desea es decir, la interfase de zinc no da una buena unión entre el aluminio y el carburo, dando como consecuencia que la matriz sea la que soporte la mayor parte de la tensión, haciendo que la función de las partículas como refuerzo sea nula.

Por otro lado, sin tener una distribución homogénea de partículas en la matriz del material de atomización y presentar una menor dureza, la unión que da el magnesio entre la matriz y las partículas de SiC fue suficiente para que el desgaste de la probeta fuera menor que en molienda. El magnesio da una mayor fuerza de unión entre los materiales para transmitir los esfuerzos de la matriz de aluminio al SiC.

## Capítulo 5. Conclusiones

- En el proceso de atomización se dan velocidades de enfriamiento las cuales no permiten que haya segregación o formación de microconstituyentes en el material, por lo que los polvos de atomización presentan una estructura de una aleación de aluminio con aleantes como zinc y cobre disueltos con formación del eutéctico debido al exceso de Si dentro de la matriz.
- Al deformar las partículas del material compuesto obtenido por el proceso de molienda, hay una mayor acumulación de energía de activación que se aprovecha en el proceso de sinterización, generando mayor difusión, por lo que el zinc difunde y se concentra creando una interfase en el material compuesto Al – SiC.
- En el material obtenido por el proceso de atomización se crea una interfase de magnesio, mientras que la interfase del material de molienda es de óxido de zinc. De estas interfases creadas depende la resistencia al desgaste.
- El material compuesto obtenido por molienda presenta una mayor dureza en comparación del material obtenido por atomización debido a que el material compuesto obtenido por molienda presenta una mejor distribución y mayor densidad de partículas de SiC.
- La interfase de magnesio que se forma en el material compuesto de polvos obtenidos por atomización es una unión química que se forma cuando el material compuesto está en estado líquido previo a la atomización.
- La unión de la matriz de aluminio con las partículas de carburo en el material compuesto obtenido por molienda es mecánica. La interfase de este material se crea en el proceso de sinterización, en donde el zinc difunde al espacio que hay entre las partículas y la matriz.
- La interfase rica en Mg del material compuesto obtenido por atomización da una mejor unión entre la matriz de aluminio y los carburos de silicio, en comparación con la interfase rica en Zn generada en el material compuesto obtenido por molienda, la cual tiene menor adherencia, provocando que el material compuesto obtenido por atomización tenga un mejor rendimiento en el ensayo de desgaste, teniendo una menor pérdida de masa.

## Referencias

- [1] Kalpakjian, S. & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*, México: Prentice-Hall Inc., pp. 221
- [2] Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: materials, process and systems*, 4ta. Edición, John Wiley & Sons, Inc., 2010, pp. 221 – 226.
- [3] Rohatgi, P. K., Asthana, R. & Das. S. (1986). *Solidification, structures and properties of cast metal – ceramic particle composites*, vol. 31, International Metals Review, pp. 23 – 45.
- [4] González López, A. G., *Material compuesto: aluminio reforzado con partículas de carburo de silicio (Tesis de licenciatura)*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1999, pp. 22 – 47.
- [5] Chawla, N. & Chawla K. K. (2006). *Metal matrix composites*, U.S.A.; Springer, pp.113 – 136.
- [6] Derek, H. (2003). *Materiales compuestos*, Barcelona, España: Editorial Reverté, pp. 37 – 58.
- [7] Callister, W. D. (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2*, Barcelona, España: Editorial Reverté, pp. 533, 534.
- [8] Rodríguez, J., Castro, L. & del Real, J. C. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos*, Madrid, España: Vision Net, pp. 38 – 42, 106, 107.
- [9] Suresh, S., Mortensen, A. & Needleman, A. (1993). *Fundamentals of Metal Matrix Composites*, U.S.A.: Butterworth – Heinemann, pp. 81 – 109.
- [10] Cervantes Tobón, A., *Caracterización de propiedades físicas, mecánicas y tribológicas de compósitos de matriz metálica obtenidos por pulvimetalurgia (Tesis de licenciatura)*, Facultad de Química, UNAM, 1994, pp. 88 – 111.
- [11] Hull, D. (2003). *Materiales compuestos*, Barcelona, España: Reverté S. A., pp. 1 – 3, 37 – 50.
- [12] Zavala Olivares, G., *Obtención de un compósito aluminio – carburo de silicio a partir de polvos metálicos (Tesis de licenciatura)*, Facultad de Química, UNAM, México, 1992, pp. 4 – 46.

- [13] Angelo, P. C. & Subramanian, R. (2009). *Powder Metallurgy: Science, technology and applications*, India: PHI Learning Private Limited, pp. 19 – 29.
- [14] Tsukerman, S. A. (1965). *Powder Metallurgy*, Gran Bretaña: Pergamon Press, pp. 10 – 15.
- [15] Molera, P. (1977). *Introducción a la Pulvimetalurgia*, Ediciones Bellaterra, S. A., Barcelona, España, pp. 9 – 18.
- [16] Upadhyaya, G. S. (2002). *Powder Metallurgy Technology*, England, U. K. Cambridge International Science Publishing, pp.10 – 12.
- [17] Rivera Ordoñez. J. G., *Estudio y evaluación de un prototipo de atomización con gas para metales y aleaciones de bajo punto de fusión (Tesis de licenciatura)*, Facultad de Química, UNAM, México, 2006, pp. 13 – 22.
- [18] Chin, G. Y. (1985). *Advances in Powder Technology*, U.S.A.: American Society for Metals, pp. 99 – 134.
- [19] González, J. L. (2003). *Metalurgia Mecánica*, México: Editorial Limusa S.A. de C.V., pp. 137 – 141.
- [20] ASTM B212-17, Standard Test Method for Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [21] ASTM B213-17, Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [22] Fang, Z. Z. (2010). *Sintering of advanced materials, fundamentals and processes*, Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing Limited, pp. 1 – 31.
- [23] Kang, S – K. (2005). *Sintering: densification, grain growth and microstructure*, Great Britain, U.K.: El Sevier, pp. 3 – 44.
- [24] Leander, F. P. & West, W. G. (2002). *Fundamentals of powder Metallurgy*, Princeton, U.S.A.: Metal Powder Industries Federation, pp. 129 – 173.
- [25] Budinski, K. G. (2014). *Friction, wear and erosion atlas*, USA: CRC Press, pp. 17 – 72.

- [26] Vingsbo, O. (1976). *Wear and wear mechanism*, USA: The American Society of Mechanical Engineering *Wear of Metals*, pp. 56 – 74.
- [27] Martínez, F. (2002). *La tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento*, México: Limusa, Noriega Editores, pp. 185
- [28] Divankar, R. & Blau, P. J. (1992). *Wear testing of advanced materials*, Philadelphia, USA, ASTM, pp. 113, 114.
- [29] ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [30] Cisnero Blas, O., *Estudio de la disolución de carburos, dureza y resistencia al desgaste de una pieza prototipo fabricada de hierro CADI (Tesis de licenciatura)*, Facultad de Química, UNAM, 2013, pp. 36 – 60.
- [31] Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales, tercera edición*, México: International Thompson Editores, pp. 142, 143.
- [32] ASTM E10-18, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [33] ASTM B214-16, Standard Test Method for Sieve Analysis of Metal Powders, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [34] Galicia González, S., *Efecto del Cu, Mg, Ni sobre la estructura, propiedades y parámetros de solidificación en la aleación A356 refinada y modificada (Tesis de licenciatura)*, Facultad de Química, UNAM, 2009, pp. 6 – 14.
- [35] Zagal Sánchez, J. M., *Compuestos intermetálicos Fe – Al40 atomizados y depositados (tesis de maestría)*, Facultad de Química, UNAM, 2002, pp. 9 – 19.
- [36] López Sánchez, F., *Material nanoestructurado Fe – 10%wt Al (Tesis de licenciatura)*, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2000, pp. 17 – 19.
- [37] Liu, C. T., Mckamey, Stiegler, J. O. & Froes, F. H., *Ordered Intermetallics*, vol. 2", 10° edición, ASM International Materials, Metals Handbook, Park, Ohio, USA, pp. 913 – 917.