



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**MATERIALES COMPUESTOS BASE COBRE PARA
APLICACIONES TRIBOLÓGICAS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALURGICO**

P R E S E N T A:

MIMBRERA TIRADO OWEN BRANDON



**DIRECTOR DE TESIS:
M. en I. MARIA GABRIELA GONZALES
FLORES**

CDMX

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: JOSE ALEJANDRO GARCIA HINOJOSA

VOCAL: Profesor: JOSE GUADALUPE RAMIREZ VIEYRA

SECRETARIO: Profesor: MARIA GABRIELA GONZALEZ FLORES

1er. SUPLENTE: Profesor: BALBINA OJEDA RAMIREZ

2° SUPLENTE: Profesor: ANTONIO ENRIQUE SALAS REYES

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE FUNDICIÓN (ÁREA DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA) UBICADO EN EL EDIFICIO “D” DE LA FACULTAD DE QUÍMICA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA.

ASESOR DEL TEMA:

M. en I. MARÍA GABRIELA GONZÁLEZ FLORES

SUSTENTANTE (S):

OWEN BRANDON MIMBRERA TIRADO

Agradecimientos a:



El Colegio de Profesores de la
Facultad de Química y la sección
024 de AAPAUNAM

Por el apoyo otorgado para el desarrollo del
trabajo el cual lleva por título:

Materiales compuestos base cobre para
aplicación tribológicas

Índice

1. Introducción	8
1.1 Problemática	9
1.2 Hipótesis	10
1.3 Objetivos	10
2. Revisión de la literatura	11
2.1 Cojinetes	11
2.1.1 Antecedentes históricos	11
2.1.2 Tipos de cojinetes	12
2.1.3 Cojinetes lisos	12
2.1.4 Materiales de fabricación	13
2.1.5 Métodos de fabricación	14
2.1.6 Ventaja y aplicaciones	15
2.2 Materiales compuestos	16
2.2.1 Refuerzos	17
2.2.2 Partículas	19
2.2.3 Importancia en la industria	20
2.3 Pulvimetalurgia	21
2.3.1 Obtención de polvos	21
2.3.2 Mezclado de polvos	22
2.3.3 Compactación	23
2.3.4 Sinterizado	24

2.4 Tribología	25
2.4.1 Norma ASTM G99.....	26
3. Selección de materiales	27
4. Metodología de trabajo.....	29
4.1 Caracterización visual	30
4.1.1 Medición.....	30
4.1.2 Líquidos penetrantes.....	30
4.2 Caracterización microestructural	31
4.3 Caracterización química.....	32
4.4 Caracterización tribológica	33
4.5 Fabricación de probetas (Pulvimetalurgia)	34
4.5.1 Recubrimiento	36
4.6 Selección de condiciones de trabajo	37
4.7 Selección del material base	38
4.7 Selección niveles de refuerzo.....	38
5. Resultados	39
5.1 Ingeniería inversa, selección de condiciones de trabajo y selección del material base	39
5.1.1 Micrografías	39
5.1.1.1 Cojinete.....	40
5.1.1.2 Materiales base.....	41
5.1.1.2 Probetas de condiciones de trabajo	43
5.1.2 Análisis químico	46

5.1.2.1 Espectrometría de masas de plasma (ICP)	47
5.2.2 Espectroscopia de Rayos X Característicos (EDS)	48
5.3. Ensayo de desgaste.....	53
5.1.4 Recubrimiento	55
5.1.5 Selección de condiciones de trabajo	56
5.1.6 Selección de material base	58
5.2 Evaluación del composito.....	59
5.2.1 Micrografías	59
5.2.2 Espectrometría de Rayos X Característicos (EDS)	64
5.2.3 Ensayo de desgaste.....	69
6. Conclusiones	74
7. Referencias.....	74
Anexos.....	78

1. Introducción

El uso de cojinetes y rodamientos se remonta a tiempos muy antiguos, aunque hoy en día, estos componentes se pueden encontrar en cualquier lugar donde haya un movimiento relativo entre dos superficies, lo que incluye prácticamente todo, desde los electrodomésticos hasta maquinaria industrial. Concretamente, un cojinete es un componente tribológico que sirve para transportar una carga mientras está en contacto con otro cuerpo presentando un movimiento que puede ser de rotación o deslizante. Básicamente hay dos tipos distintos de cojinetes: cojinetes lisos (cojinetes) y cojinetes de rodillos (rodamientos) [1].

La importancia de un buen cojinete radica en la productividad que alcanza la máquina o artefacto que lo contiene. Este componente debe contar con buena conductividad térmica, alta resistencia al desgaste, bajo coeficiente de fricción, fácil trabajabilidad, alta capacidad de carga y resistencia a la corrosión, baja expansión térmica y capacidad de incrustación de partículas extrañas además de un bajo costo.

Los materiales utilizados para la fabricación de los cojinetes contemplan una amplia gama de opciones, dividiéndolos en tres grandes grupos, los materiales metálicos, los poliméricos y los compuestos. Dentro de los metálicos se encuentran hierros, aceros, aleaciones de cobre, aluminio e inclusive zinc. Del lado de los polímeros destacan los plásticos fenólicos, nailon, politetrafluoroetileno, entre algunos otros. El último grupo lo conforman combinaciones entre ambos, teniendo cojinetes formados por compositos metal-polímero o reforzados con alguna fibra o partícula como lo es el grafito [2,3].

Las notables propiedades del cobre (además de la posibilidad de incrementarlas mediante su aleación con estaño o zinc), hacen que los cojinetes base cobre se estén empleando ampliamente en aplicaciones aeroespaciales y automotrices, en aplicaciones industriales con grandes exigencias, sometidos a bajas velocidades y cargas pesadas, así como en máquinas utilizadas para la fabricación de hierro y acero, equipos para la industria alimentaria, máquinas de moldeo por inyección, equipos autopropulsados, maquinaria de movimiento de tierra, bombas y muchas otras industrias.

Al alear el cobre con estaño, un cojinete de este material puede resistir mejor la fatiga, presentar una buena ductilidad, exhibir baja fricción contra otros metales y conducir el calor y la electricidad mejor que la mayoría de los aceros además de alcanzar una mayor resistencia al impacto, al desgaste y a la corrosión con relación a los fabricados de latón. [1,4].

1.1 Problemática

En la industria uno de los aspectos más importantes es el diseño de componentes que tengan una vida útil más prolongada. En este sentido, la búsqueda de los mejores materiales para la fabricación de estos componentes se ha convertido en una tarea vital. Una herramienta que permite estudiar y evaluar estos nuevos materiales es la ingeniería inversa. Este enfoque implica la caracterización de un componente comercial existente o en uso, para luego utilizar esa información como base en la fabricación y comparación de un nuevo material con propiedades superiores.

Los cojinetes de aleación base cobre (el cobre es el principal elemento presente en la aleación) con estaño o zinc, son ampliamente utilizadas en aplicaciones aeroespaciales, automotrices e industriales debido a las destacadas propiedades del cobre. Estos cojinetes presentan buena ductilidad, baja fricción, alta conductividad térmica y eléctrica, y resistencia al impacto, desgaste y corrosión. Sin embargo, requieren lubricación externa con grasa o aceite para reducir la fricción y el desgaste [5].

Para abordar este problema, se han propuesto materiales compuestos con grafito, que actúan como lubricante y evitan la acumulación de residuos. Además, la adición de partículas de carburo de silicio mejora las propiedades mecánicas de los cojinetes. Estas innovaciones permiten el desarrollo de cojinetes autolubrificantes de mayor rendimiento.

La ingeniería inversa, es una metodología conveniente para la caracterización y el estudio del comportamiento de los cojinetes de bronce. Se conoce que la ingeniería inversa tiene varias aplicaciones en el campo del desarrollo tecnológico; con respecto a la fabricación de productos, resulta útil en el diseño de nuevos productos o en la modificación de estos, en la sustitución de partes desgastadas o rotas, en la inspección industrial, en la documentación de diseños, en el desarrollo de información para la manufactura y en análisis del mercado. Entre las ventajas de aplicar esta metodología se encuentran: recuperar información, reducir el tiempo de desarrollo, minimizar costos, detectar fallas en el producto o sistema y mejorar la calidad del proceso o producto [6].

Con la finalidad de obtener información técnica de una pieza real (en el mercado) para ser reproducida o modificada, la ingeniería inversa cuenta con diversas técnicas entre las cuales se encuentran las pruebas destructivas y no destructivas. Por medio de estas pruebas, el componente podrá ser caracterizado con el fin de determinar composición química, microestructura, propiedades mecánicas y tribológicas. Con la información recabada se comprueba el desempeño antes y

después del uso y se documenta la modificación ya sea por medio de la selección de un nuevo material o un método de manufactura alternativo que proporcione un mejor desempeño del componente [7].

El presente trabajo busca aplicar ingeniería inversa para la caracterización de un componente de mercado o de uso cotidiano y con esto proponer un reforzamiento del material base y así estudiar el efecto de la presencia simultánea de partículas de grafito y carburo de silicio sobre la microestructura, propiedades mecánicas y comportamiento al desgaste de materiales compuestos de matriz base cobre para su aplicación en cojinetes autolubricados.

1.2 Hipótesis

La adición de grafito reduce la fricción durante su aplicación en cojinetes base cobre, es probable que proporcione auto lubricación al emplearse como refuerzo en compositos base cobre. El carburo de silicio por su parte quizá aporte resistencia al desgaste e incremente la resistencia mecánica del material base. El empleo de materiales compuestos matriz base cobre reforzados con grafito y carburo de silicio producidos por vía pulvimetalúrgica proporcionará propiedades mecánicas y tribológicas superiores que el material tradicional empleado en cojinetes.

1.3 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal fabricar materiales compuestos de matriz base cobre para su aplicación en cojinetes autolubricados.

Como objetivos particulares se busca:

- Caracterizar la composición química, la microestructura y las propiedades tribológicas por medio de ingeniería inversa (ensayos destructivos y no destructivos)
- Caracterizar la microestructura y la composición de los compositos empleando las técnicas de Microscopía Óptica (MO), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), Espectroscopia de Rayos X Característicos (EDS) y/o Espectrometría de masas de plasmas (ICP).
- Evaluar el efecto de la presencia simultanea de partículas de grafito y partículas de carburo de silicio (SiC_p) sobre la microestructura, dureza y resistencia al desgaste de los compositos obtenidos.

2. Revisión de la literatura

2.1 Cojinetes

Un cojinete, también conocido como rodamiento, es un componente mecánico que permite el movimiento relativo entre dos partes de una máquina o equipo. Su función principal es reducir la fricción y el desgaste al facilitar un movimiento suave y eficiente. Los cojinetes son fundamentales en una amplia gama de industrias, desde la automotriz y la aeroespacial hasta la manufactura y la energía. Proporcionan un funcionamiento suave, reducen la fricción y el desgaste y ayudan a prolongar la vida útil de los equipos.

2.1.1 Antecedentes Históricos

La historia de los cojinetes es un testimonio del ingenio humano y el deseo de reducir la fricción y mejorar la eficiencia en las máquinas y herramientas. El uso de cojinetes y rodamientos se remonta a tiempos antiguos. Los primeros indicios de cojinetes se encontraron en la antigua Mesopotamia y Egipto alrededor del año 3000 a.C. En aquel entonces, se utilizaban rudimentarios cojinetes de madera o piedra para reducir la fricción en las partes móviles de las máquinas y herramientas.

Durante la Edad Media, hubo avances limitados en la tecnología de los cojinetes, empleándose cojinetes de deslizamiento hechos de metales blandos, como el bronce, en molinos y maquinaria sencilla. Sin embargo, en el siglo XVIII, se produjeron avances significativos. El inventor británico John Harrison desarrolló los cojinetes de joya, mejorando la precisión y durabilidad de los relojes marinos, permitiendo una navegación más precisa.

Durante la Revolución Industrial, la demanda de cojinetes aumentó con la expansión de la maquinaria y la industria. En 1839, el inventor británico J. Ramsbottom patentó los cojinetes de bronce sólido. Luego, en 1883, Friedrich Fischer, un ingeniero alemán, inventó los cojinetes de bolas de acero de alta precisión y fundó la empresa FAG (Fischer Aktien-Gesellschaft).

A lo largo del siglo XX, los cojinetes experimentaron un desarrollo significativo en términos de materiales y tecnología. Se introdujeron nuevos materiales, como los cojinetes autolubricantes de bronce impregnados de aceite y los cojinetes de plástico de alto rendimiento. Además, se desarrollaron cojinetes de rodillos y rodamientos de rodillos cónicos para aplicaciones de alta carga y velocidad.

En la actualidad, los cojinetes continúan evolucionando para adaptarse a las demandas de las aplicaciones modernas, como la industria automotriz, aeroespacial y de energía renovable. Se están desarrollando cojinetes inteligentes, utilizando sensores y tecnología de monitoreo para realizar un seguimiento del rendimiento y

detectar fallos en tiempo real. Los avances en la nanotecnología y los materiales avanzados siguen impulsando mejoras en la durabilidad, eficiencia y capacidad de carga de los cojinetes [8-10].

2.1.2 Tipos de cojinetes

La geometría y el diseño de los cojinetes (figura 1) pueden variar según la aplicación específica y las condiciones de funcionamiento. Algunos tipos comunes de cojinetes incluyen [11,12]:

- Cojinetes de bolas: Utilizan bolas como elementos rodantes y se utilizan en aplicaciones de baja carga y alta velocidad, como en bicicletas y motores eléctricos pequeños.
- Cojinetes de rodillos: Emplean rodillos cilíndricos, cónicos o esféricos como elementos rodantes y son adecuados para cargas más pesadas y velocidades moderadas, como en automóviles y maquinaria industrial.
- Cojinetes de agujas: Utilizan agujas delgadas y largas como elementos rodantes, y se utilizan en aplicaciones de alta carga y espacio limitado, como en cajas de cambios y máquinas herramienta.
- Cojinetes lisos o de deslizamiento: No tienen elementos rodantes y funcionan mediante una capa de lubricante que separa las superficies en movimiento. Se utilizan en aplicaciones de baja velocidad y alta carga, como en motores marinos y turbinas hidráulicas. Para este proyecto se hará énfasis en este tipo de cojinetes.



Figura 1. Ejemplo de tipo de cojinetes [13]

2.1.3 Cojinetes lisos

Como se mencionó anteriormente, los cojinetes lisos ofrecen una solución confiable y duradera en muchas aplicaciones, especialmente cuando se requiere una alta capacidad de carga y resistencia a condiciones extremas. Sin embargo, es

importante realizar un mantenimiento adecuado, como la lubricación regular y la inspección de desgaste, para garantizar un rendimiento óptimo y prolongar la vida útil de los cojinetes lisos [11].

Los cojinetes lisos consisten en dos componentes principales: el eje (o árbol) y el casquillo (o buje). El eje es la superficie exterior que se desliza dentro del casquillo, que es la superficie interior. Ambas superficies deben tener una geometría adecuada y una rugosidad controlada para permitir un deslizamiento suave y uniforme.

Su funcionamiento se basa en el principio de deslizamiento directo. Este principio consiste en dos superficies, una fija y otra móvil, que están en contacto directo y se deslizan una sobre la otra. Entre estas superficies se coloca una capa de lubricante, que forma una película que reduce la fricción y el desgaste.

A lo largo del tiempo, el cojinete liso puede experimentar un desgaste gradual debido al deslizamiento constante entre las superficies en movimiento y la presión aplicada por lo cual la lubricación es esencial para el funcionamiento óptimo de los cojinetes lisos. El lubricante, generalmente aceite o grasa, se introduce en el espacio entre el eje y el casquillo para formar una película lubricante que separa las superficies en movimiento. El lubricante reduce la fricción y el desgaste, disipa el calor generado por la fricción y actúa como un medio de limpieza para eliminar partículas abrasivas [12].

2.1.4 Materiales de fabricación

Los cojinetes lisos están hechos de materiales que tienen buenas propiedades de deslizamiento y resistencia al desgaste. A continuación, se presentan algunos de los materiales comúnmente utilizados en la fabricación de cojinetes lisos:

El acero al carbono se utiliza en cojinetes lisos cuando se requiere una mayor resistencia y capacidad de carga. El acero al carbono ofrece una buena resistencia a mecánica y una alta dureza. Sin embargo, puede requerir una lubricación adecuada para reducir la fricción y el desgaste.

El acero inoxidable es una opción popular cuando se requiere resistencia a la corrosión en aplicaciones de cojinetes lisos. Tiene una buena resistencia mecánica y puede funcionar en ambientes agresivos sin deterioro significativo. El acero inoxidable también ofrece una baja fricción y buena capacidad de carga.

Los polímeros autolubricantes, como el polietileno y el poliuretano, se utilizan en aplicaciones que requieren una baja fricción y una operación libre de lubricantes externos. Estos polímeros tienen propiedades autolubricantes incorporadas, lo que reduce la necesidad de una lubricación adicional.

El bronce es una aleación de cobre y estaño, y es uno de los materiales más utilizados en la fabricación de cojinetes lisos. Tiene una excelente resistencia al desgaste, buena capacidad de carga y baja fricción. El bronce también ofrece una buena resistencia a la corrosión, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en ambientes corrosivos [2].



Figura 2. Ejemplo ilustrativo de metales y aleaciones [14]

Los materiales compuestos se utilizan en la fabricación de cojinetes debido a sus propiedades mejoradas y rendimiento superior en comparación con los materiales convencionales. Estos materiales ofrecen una combinación de resistencia, rigidez, resistencia al desgaste, baja fricción y capacidades autolubricantes. Además, pueden adaptarse específicamente para aplicaciones tribológicas en cojinetes, lo que los hace ideales para su uso en entornos de alto rendimiento y alta carga.

2.1.5 Métodos de fabricación de cojinetes

Pulvimetalurgia: Este proceso se utiliza para fabricar cojinetes autolubricantes o de metal sinterizado. Consiste en compactar polvos metálicos y calentarlos a una temperatura controlada en un horno, es importante mencionar que generalmente este proceso es realizado en una atmosfera controlada para evitar la oxidación del material. Con la sinterización los polvos se fusionan parcialmente y forman una estructura porosa. Luego, se realiza el mecanizado adicional para obtener la forma y las dimensiones finales [15].

Moldeo por inyección: Este proceso se utiliza principalmente para fabricar cojinetes de polímero, como los cojinetes de plástico. El material fundido se inyecta en un molde y se enfría para solidificar y obtener la forma deseada del cojinete. Luego, se realiza el mecanizado si es necesario [16].

Fundición: En este proceso, se funde el material (como bronce, acero u otros metales) y se vierte en un molde para crear la forma básica del cojinete. La fundición puede ser por gravedad o mediante fundición a presión. Posteriormente, se realiza el mecanizado para lograr las dimensiones y tolerancias precisas.

Colada centrífuga. En este proceso, se llena un molde con metal líquido y se hace girar rápidamente. Este método de fabricación garantiza una estructura interna uniforme, una distribución homogénea del material y una menor porosidad en los cojinetes resultantes, los cuales se utilizan ampliamente en aplicaciones donde se requiere resistencia y durabilidad, como en motores y maquinaria industrial [17].

2.1.6 Ventajas y aplicaciones

Es importante tener en cuenta que las ventajas específicas de los cojinetes lisos pueden variar según el diseño, el material y las condiciones de aplicación. La selección adecuada del cojinete depende de los requisitos específicos de la aplicación y las condiciones de trabajo. Consultar con fabricantes y proveedores especializados puede brindar información adicional y detalles específicos sobre las ventajas de los cojinetes lisos.

Los cojinetes lisos ofrecen varias ventajas en comparación con otros tipos de cojinetes [18]:

- Alta capacidad de carga: tienen una alta capacidad de carga en comparación con otros tipos de cojinetes. Debido a su diseño de deslizamiento, pueden soportar cargas pesadas y distribuirlas de manera uniforme a lo largo de la superficie de deslizamiento.
- Reducción de vibraciones y ruido: tienen la capacidad de absorber vibraciones y reducir el ruido generado durante el funcionamiento. Esto los hace adecuados para aplicaciones donde se requiere un funcionamiento suave y silencioso, como en maquinaria industrial, motores y sistemas de transmisión.
- Tolerancia a altas velocidades: pueden funcionar a altas velocidades sin comprometer su rendimiento. La lubricación adecuada y el diseño apropiado permiten que los cojinetes lisos funcionen de manera confiable y sin problemas incluso a velocidades de rotación altas.
- Adaptabilidad a condiciones ambientales adversas: son más resistentes a la contaminación y las condiciones ambientales adversas en comparación con otros tipos de cojinetes. Pueden tolerar mejor la presencia de partículas abrasivas, polvo, humedad y corrosión, lo que los hace adecuados para aplicaciones en entornos difíciles.

- Costos de fabricación y mantenimiento reducidos: En general, son más económicos de fabricar y mantener en comparación con otros tipos de cojinetes, como los cojinetes de rodillos o los cojinetes de bolas. Requieren menos componentes y su diseño simple facilita la instalación y el mantenimiento.
- Mayor durabilidad y vida útil: pueden tener una vida útil prolongada cuando se les proporciona una lubricación adecuada y se les realiza un mantenimiento regular. Su diseño robusto y la capacidad de distribuir la carga de manera uniforme ayudan a minimizar el desgaste y prolongar la vida útil del cojinete.

Debido a estas características los cojinetes lisos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, que incluyen [19]:

- Maquinaria industrial: se utilizan en maquinaria industrial, como motores eléctricos, generadores, compresores, bombas y ventiladores. Proporcionan soporte y reducen la fricción en las partes móviles de estas máquinas, permitiendo un funcionamiento suave y eficiente.
- Automoción: se encuentran en diversos componentes del sistema de transmisión de vehículos, como las ruedas, las transmisiones, los ejes y las cajas de cambios. Proporcionan un soporte confiable y permiten un movimiento suave y preciso en estas aplicaciones de alta carga y velocidad.
- Aeronáutica y espacial: se utilizan en aviones, helicópteros, cohetes y satélites debido a su capacidad para soportar cargas pesadas y operar a altas velocidades. También ofrecen resistencia a las vibraciones y al choque térmico en entornos extremos.
- Energía eólica: se emplean en los rotores y las cajas de engranajes de las turbinas eólicas. Ayudan a soportar las cargas radiales y axiales generadas por la rotación de las palas y garantizan un funcionamiento eficiente y de larga duración.
- Industria naval: se utilizan en el sector marítimo para aplicaciones como los ejes de propulsión, las hélices y los timones. Son resistentes a la corrosión y ofrecen un funcionamiento confiable en ambientes marinos agresivos.
- Maquinaria agrícola y construcción: se encuentran en equipos agrícolas, como tractores, cosechadoras y pulverizadores, así como en maquinaria de construcción, como excavadoras y cargadoras. Proporcionan un soporte duradero y resistente en condiciones exigentes.

2.2 Materiales compuestos

Un material compuesto o también conocido como compósito, es una combinación de dos o más materiales diferentes e inmiscibles que se unen para formar una estructura con propiedades mejoradas en comparación con los materiales individuales por separado. La idea principal detrás de los materiales compuestos es aprovechar las fortalezas de cada componente y combinarlas de manera sinérgica para obtener un material con propiedades superiores [20].

La estructura de un material compuesto se divide en dos o más fases distintas: la matriz y los refuerzos. Estas fases son diferenciables las unas de las otras y tienen diferentes tipos de propiedades tanto físicas como químicas.

La matriz es la fase continua en un material compuesto y actúa como una especie de "pegamento" que mantiene unidos los refuerzos y transfiere las cargas mecánicas entre ellos. La elección de la matriz depende de las propiedades deseadas del material compuesto y del entorno en el que se utilizará [20, 21].

- **Matrices poliméricas:** Los polímeros ofrecen una amplia variedad de propiedades y se utilizan comúnmente en materiales compuestos debido a su bajo peso, alta resistencia química, flexibilidad y facilidad de procesamiento. Ejemplos de polímeros utilizados como matrices son el polietileno, poliésteres, epoxis y poliuretanos.
- **Matrices metálicas:** Los metales, como el aluminio, el cobre o el acero, pueden actuar como matrices en materiales compuestos. Estas matrices metálicas proporcionan alta conductividad térmica y eléctrica, resistencia a altas temperaturas y rigidez. Los materiales compuestos metálicos son ampliamente utilizados en aplicaciones aeroespaciales y automotrices debido a su resistencia y durabilidad.
- **Matrices cerámicas:** Los cerámicos se utilizan como matrices en materiales compuestos debido a su alta resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión y rigidez. Los materiales compuestos cerámicos se utilizan en aplicaciones que requieren alta resistencia y rigidez, como componentes de motores de aviones y sistemas de frenado de alta temperatura.

2.2.1 Refuerzos

Los refuerzos son las fases dispersas dentro de la matriz y son responsables de mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto. En general se clasifican en dos grandes grupos: continuos y discontinuos y se seleccionan en función de las propiedades deseadas del material final [21,22].

Los refuerzos continuos son un tipo de refuerzo utilizado en los materiales compuestos que consiste en fibras largas y continuas que se dispersan de manera ordenada y alineada en la matriz del material. Estas fibras pueden ser de diferentes materiales, como carbono, vidrio, aramida o cerámica.

La principal característica de los refuerzos continuos es su alta resistencia y rigidez. Debido a su estructura alineada unidireccionalmente, son capaces de resistir eficientemente las cargas aplicadas en la dirección principal de las fibras. Esto proporciona al material compuesto una alta resistencia y rigidez en esa dirección específica.

Algunos ejemplos comunes de refuerzos continuos son las fibras de carbono y las fibras de vidrio. Las fibras de carbono son especialmente conocidas por su alta resistencia y rigidez, así como su bajo peso. Son ampliamente utilizadas en aplicaciones aeroespaciales, automotrices y deportivas, donde se requiere una combinación de resistencia y peso ligero.

Otro ejemplo de refuerzo continuo son los laminados. Consisten en capas delgadas y planas de material, generalmente fibra de carbono, fibra de vidrio o aramida, que se disponen en forma de láminas y se integran en la matriz para mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto.

A diferencia de los refuerzos continuos, los refuerzos discontinuos se componen de fibras cortas o partículas dispersas de manera aleatoria en la matriz del material compuesto.

Una ventaja de los refuerzos discontinuos es que proporcionan una mayor resistencia y rigidez en múltiples direcciones. A diferencia de los refuerzos continuos que tienen una orientación unidireccional, los refuerzos discontinuos están distribuidos aleatoriamente en la matriz, lo que les permite resistir cargas aplicadas en diferentes direcciones. Esto hace que los refuerzos discontinuos sean adecuados para aplicaciones en las que las cargas varían en diferentes direcciones, como en componentes sometidos a esfuerzos multidireccionales [21, 22].

- Fibras cortas: Generalmente tienen una longitud que varía de unos pocos milímetros a varios centímetros. Estas fibras se dispersan aleatoriamente en la matriz y pueden ser de diferentes materiales, como vidrio, carbono, aramida o cerámica. Las fibras cortas proporcionan una mejora significativa en la resistencia y rigidez del material compuesto, así como una mayor resistencia al impacto.
- Partículas: Estas partículas pueden ser de diferentes tamaños y formas, y se dispersan en la matriz para mejorar ciertas propiedades del material compuesto. Por ejemplo, las partículas cerámicas se pueden agregar para

mejorar la resistencia al desgaste, mientras que las partículas metálicas pueden mejorar la conductividad eléctrica o térmica.

Los refuerzos discontinuos se seleccionan según las propiedades específicas que se desean mejorar en el material compuesto. Por ejemplo, las fibras cortas de vidrio pueden mejorar la resistencia a la tracción, mientras que las partículas cerámicas pueden mejorar la resistencia al desgaste. Esta capacidad de personalización permite adaptar los materiales compuestos a aplicaciones específicas según los requisitos de rendimiento.

En la figura 3 se muestran tres modelos que permiten visualizar el arreglo matriz-refuerzo en función de los diferentes tipos de refuerzo en un material compuesto.



Figura 3. Tipos de refuerzos

2.2.2 Partículas

Las partículas son uno de los tipos más comunes de refuerzos discontinuos utilizados en materiales compuestos. Estas partículas pueden tener diversas formas y tamaños, y se dispersan en la matriz del material compuesto para mejorar ciertas propiedades [22,23].

Las partículas pueden variar en tamaño desde micrómetros hasta milímetros. Pueden tener formas diferentes, como esférica, irregular o alargada. El tamaño y la forma de las partículas tienen un impacto significativo en las propiedades del material compuesto, como la resistencia mecánica, la tenacidad y la resistencia al desgaste.

Las partículas pueden estar compuestas de diferentes materiales, como metales, cerámicas, polímeros o compuestos. Cada material de partícula tiene propiedades únicas que pueden mejorar aspectos específicos del material compuesto. Por ejemplo, las partículas cerámicas como el óxido de aluminio o el carburo de silicio

pueden mejorar la resistencia al desgaste, mientras que las partículas metálicas pueden mejorar la conductividad eléctrica o térmica [22].

Las partículas se dispersan en la matriz del material compuesto de manera uniforme o aleatoria. La forma en que se distribuyen las partículas puede afectar la resistencia y la rigidez del material compuesto. Una distribución uniforme de partículas puede mejorar las propiedades en todas las direcciones, mientras que una distribución aleatoria puede proporcionar un refuerzo localizado en áreas específicas.

La incorporación de partículas como refuerzo discontinuo puede proporcionar una serie de mejoras en las propiedades del material compuesto. Estas mejoras pueden incluir un aumento en la resistencia mecánica, la rigidez, la resistencia al desgaste, la resistencia al impacto y la estabilidad dimensional. Sin embargo, también es importante considerar los posibles efectos negativos, como la reducción de la ductilidad o la tenacidad, que pueden ocurrir dependiendo del tipo y la cantidad de partículas utilizadas [22,24].

La interacción entre la matriz y las partículas es crucial para las propiedades del material compuesto. Una buena adhesión entre la matriz y las partículas asegura una transferencia efectiva de carga y una distribución uniforme de tensiones. Los tratamientos de superficie o el uso de agentes de acoplamiento pueden mejorar la adhesión y la compatibilidad entre la matriz y las partículas [22].

2.2.3 Importancia a nivel industrial

Los materiales compuestos son de gran importancia en la industria debido a su capacidad para mejorar las propiedades y el rendimiento de los productos. Su alta relación resistencia-peso los convierte en opciones ideales para aplicaciones donde se requiere resistencia estructural con un peso reducido. Además, su capacidad para ofrecer propiedades personalizadas, como resistencia a la corrosión y al desgaste, los hace aptos para entornos agresivos [21].

Los materiales compuestos permiten la fabricación de componentes con formas complejas y geometrías personalizadas, lo que brinda a los ingenieros una mayor libertad en el diseño y la optimización del rendimiento. Su durabilidad y resistencia a largo plazo reducen los costos de mantenimiento y prolongan la vida útil de los productos.

Además, estos materiales impulsan la innovación y el avance tecnológico en diversas industrias, donde se requiere un alto rendimiento y una mejora continua. En conclusión, los materiales compuestos son vitales en la industria debido a su capacidad para proporcionar propiedades superiores y contribuir al desarrollo de productos eficientes, seguros y sostenibles [21, 22].

2.3 Pulvimetalurgia

La metalurgia de polvos o pulvimetalurgia es una rama de la metalurgia que se enfoca en la producción y procesamiento de componentes metálicos a partir de polvos finamente divididos. A través de diversos procesos, como la compactación y la sinterización, los polvos metálicos se transforman en componentes densos y sólidos con propiedades físicas y mecánicas mejoradas [25].

A continuación, se detalla cada uno de los procesos (figura 4) que se llevan a cabo durante la fabricación por la vía pulvimetalúrgica:

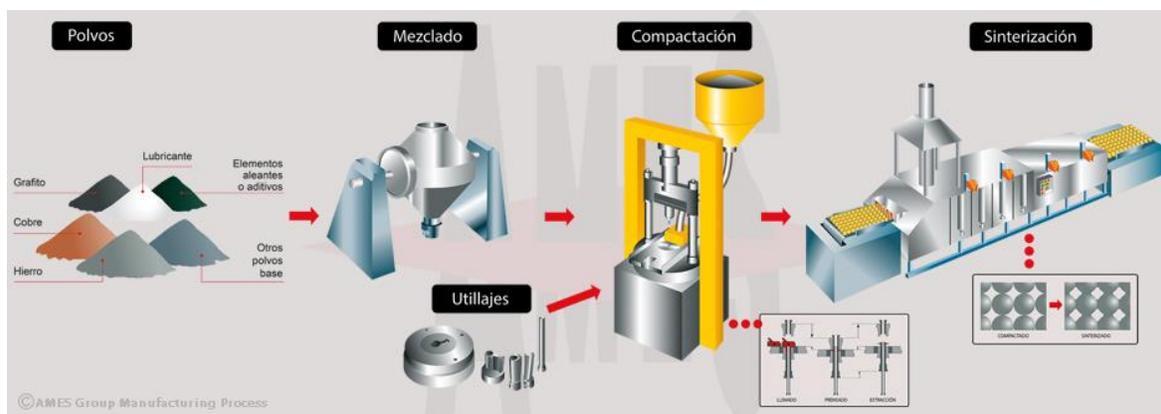


Figura 4. Proceso de pulvimetalurgia

2.3.1 Producción de polvos.

Los polvos metálicos que se utilizarán para la fabricación del material se producen mediante técnicas como:

Atomización: Es la técnica más utilizada para producir polvos metálicos. En este proceso, un metal líquido se atomiza en pequeñas gotas utilizando métodos como atomización por agua, atomización por gas o atomización por centrifugación. Las gotas se enfrían rápidamente al entrar en contacto con un medio refrigerante, como agua o gas, lo que resulta en la solidificación de las gotas en forma de polvo. Este método permite obtener polvos con un tamaño de partícula controlado y una distribución de tamaño uniforme [25, 26].

Trituración o molienda mecánica: Esta técnica se utiliza para reducir el tamaño de trozos de metal en polvo. Los trozos de metal se colocan en un molino de bolas o un molino de atrición, donde son sometidos a fuerzas de impacto, corte y fricción

que los descomponen en partículas más pequeñas. El resultado es un polvo con un tamaño de partícula más fino y una distribución de tamaño más uniforme.

Reducción química: En este método, se utilizan reacciones químicas controladas para transformar compuestos metálicos en polvos metálicos. Por ejemplo, la reducción carbotérmica implica calentar un compuesto metálico, como un óxido metálico, en presencia de un agente reductor, como carbono, para producir polvo metálico. Este proceso permite obtener polvos con alta pureza y composición química precisa.

Otros métodos: Además de las técnicas mencionadas, existen otros métodos para la producción de polvos metálicos, como la pulverización catódica, la deposición electrolítica y la precipitación química. Estos métodos pueden ser utilizados en situaciones específicas para obtener polvos con propiedades particulares.

2.3.2 Mezclado de polvos

El mezclado en la pulvimetalurgia es una etapa crítica en el proceso de fabricación de componentes metálicos a partir de polvos. Consiste en combinar los polvos metálicos con aditivos, lubricantes en un equipo especializado, como un mezclador de alta energía o un mezclador en V, para obtener una mezcla homogénea y uniforme.

El objetivo principal del mezclado en la pulvimetalurgia es lograr una distribución uniforme de los polvos y aditivos en la mezcla. Esto es crucial para garantizar la calidad del material final y las propiedades deseadas. Durante el proceso de mezclado, se aplican fuerzas mecánicas y de cizallamiento a los polvos, lo que ayuda a romper los aglomerados y a mejorar la dispersión de los componentes [26, 27].

En el contexto de los materiales compuestos, el mezclado se lleva a cabo para combinar la matriz y el refuerzo de manera efectiva. La matriz es el material que actúa como la fase continua y envuelve o rodea al refuerzo, que es el material que proporciona las propiedades adicionales al compuesto. Para lograr una distribución uniforme del refuerzo en la matriz, es esencial realizar un proceso de mezclado adecuado.

Existen diferentes métodos de mezclado utilizados en la fabricación de materiales compuestos, entre los cuales se encuentran [28]:

Mezclado en seco: Consiste en combinar los componentes secos, es decir, la matriz en forma de polvo o gránulos y el refuerzo en forma de partículas, fibras o láminas. Se utiliza equipo especializado, como mezcladores de tambor, mezcladores de paletas o mezcladores de alto cizallamiento, para lograr una distribución uniforme

de los componentes. Este proceso se puede realizar en frío o a temperatura ambiente.

Mezclado en húmedo: En este método, los componentes se mezclan en presencia de un líquido, generalmente un agente de unión o un solvente. El líquido ayuda a dispersar y distribuir uniformemente los componentes en la matriz. El mezclado en húmedo se utiliza principalmente para materiales compuestos que involucran partículas finas o aditivos especiales.

Algunos de los factores importantes a considerar durante el mezclado en la pulvimetalurgia incluyen la duración (tiempo) y la intensidad del mezclado, así como la selección de los aditivos y lubricantes adecuados. La duración del mezclado puede variar dependiendo del tamaño de los polvos y la mezcla requerida, y generalmente se controla para asegurar una distribución uniforme sin causar una excesiva aglomeración de partículas.

Es importante tener en cuenta que el proceso de mezclado en la pulvimetalurgia debe llevarse a cabo en condiciones controladas y con equipos adecuados para evitar la contaminación de los polvos y garantizar la calidad del material final. Además, se deben seguir las pautas y recomendaciones específicas para cada material y proceso de fabricación.

2.3.3 Compactación

El proceso de compactación en la metalurgia de polvos es una etapa fundamental para dar forma a los materiales en forma sólida a partir de los polvos metálicos. Consiste en aplicar presión a los polvos contenidos en un molde o matriz para comprimirlos y conformarlos en la forma deseada.

El proceso de compactación se realiza generalmente en prensas de compactación, que aplican una fuerza axial sobre los polvos. Durante la compactación, los polvos se someten a una serie de cambios físicos y mecánicos. La presión aplicada hace que los polvos se adhieran entre sí y se deformen plásticamente, lo que resulta en una disminución de su volumen y un aumento en su densidad [25, 27].

La calidad y precisión de la compactación dependen de varios factores, como la presión aplicada, la velocidad de compactación, la geometría del molde y las propiedades de los polvos. La presión aplicada debe ser suficientemente alta para garantizar una buena adhesión de las partículas y una densificación adecuada, pero también se debe tener cuidado para evitar la fractura excesiva de las partículas y la formación de porosidad [25, 27].

Además de la presión, la temperatura también puede jugar un papel importante en el proceso de compactación en algunos casos. En la metalurgia de polvos, se

pueden utilizar técnicas de compactación en caliente, donde los polvos se compactan a temperaturas elevadas para facilitar la deformación plástica y mejorar la densificación.

Después de la compactación, el material en forma de preforma o compacto aún no tiene la resistencia y la integridad estructural requeridas. Por lo tanto, generalmente se requiere una etapa adicional de sinterización para consolidar los polvos y promover la difusión atómica entre las partículas [27].

2.3.4 Sinterizado

El sinterizado es un proceso crucial en la pulvimetalurgia que se utiliza para consolidar y dar forma a los compactos de polvos metálicos. Consiste en calentar los compactos a una temperatura inferior a la temperatura de fusión del material, lo que permite que las partículas de polvo se fusionen parcialmente y se unan entre sí mediante difusión atómica [28].

Durante el proceso de sinterizado, la energía superficial juega un papel crucial en la formación y consolidación de los materiales compuestos. La energía superficial se refiere a la energía asociada con la superficie de los materiales y está influenciada por la tensión superficial y las fuerzas de unión entre las partículas.

En el sinterizado, las partículas de los polvos de matriz y refuerzo se calientan a temperaturas elevadas, lo que provoca una fusión parcial de las partículas y una reducción de la energía superficial. A medida que las partículas se acercan y entran en contacto, las fuerzas de cohesión entre ellas se vuelven dominantes sobre las fuerzas de superficie. Esto resulta en una disminución de la energía superficial y la formación de puentes de material entre las partículas [26, 28].

Durante la consolidación, la reducción de la energía superficial impulsa el flujo y la difusión de los átomos en la interfaz de contacto entre las partículas. Los átomos de la matriz y los refuerzos se difunden y se redistribuyen en la matriz, promoviendo la unión entre ellos. Los refuerzos pueden actuar como sitios de nucleación para la formación de puentes de material, lo que refuerza la unión y mejora las propiedades mecánicas del material compuesto, este fenómeno es conocido como “cuello de botella” figura 5.

Es importante controlar adecuadamente el proceso de sinterizado para aprovechar la reducción de la energía superficial de manera óptima. Los parámetros como la temperatura, el tiempo de sinterizado y la presión aplicada deben ser ajustados para lograr una consolidación efectiva y una densificación adecuada del material compuesto. Un control preciso de estos parámetros garantiza una reducción

adecuada de la energía superficial y la formación de una estructura cohesiva y resistente en el material final [25].

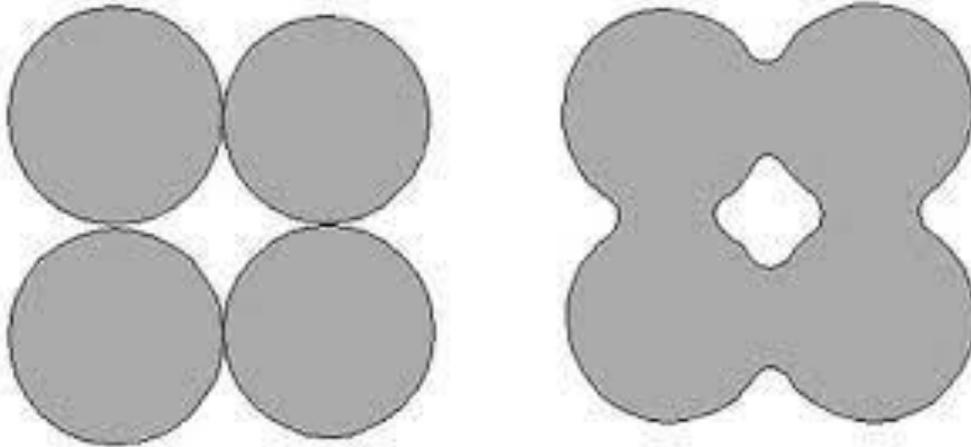


Figura 5. Modelo de difusión de las partículas

2.4 Tribología

La tribología es una disciplina científica que se centra en el estudio de la interacción de las superficies en movimiento relativo y los fenómenos asociados, como la fricción, el desgaste y la lubricación. Su objetivo es comprender y controlar estas interacciones para mejorar la eficiencia y durabilidad de los sistemas mecánicos. [29]

La fricción es una fuerza resistente que se opone al movimiento relativo entre dos superficies en contacto. Puede ser de dos tipos: fricción estática, que actúa cuando las superficies están en reposo, y fricción dinámica, que actúa cuando las superficies están en movimiento. El coeficiente de fricción es una medida de la resistencia al deslizamiento entre dos superficies y puede variar según las condiciones de carga, velocidad, temperatura y lubricación. [29, 30]

El desgaste es la pérdida progresiva de material de las superficies en contacto debido a la fricción y otros factores. Puede manifestarse en forma de desgaste abrasivo, adhesivo, corrosivo o erosivo. La selección de materiales y la optimización de las condiciones de operación son importantes para minimizar el desgaste y prolongar la vida útil de los componentes.

La lubricación es fundamental para reducir la fricción y el desgaste. Consiste en la introducción de una sustancia lubricante entre las superficies en contacto para formar una película lubricante que reduce la fricción y protege contra el desgaste.

Los lubricantes pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y se seleccionan en función de las condiciones de operación, como la carga, la velocidad, la temperatura y el entorno.[30]

2.4.1 Norma ASTM G99 [31]

La norma ASTM G99, titulada "Standard Test Method for Wear Testing with a Block-on-Ring Apparatus", es una norma internacionalmente reconocida y ampliamente utilizada en la evaluación de la resistencia al desgaste de los materiales. Esta norma proporciona pautas específicas y detalladas para llevar a cabo el ensayo de desgaste en bloque-deslizante, que es una técnica comúnmente utilizada para simular y medir el desgaste en condiciones de contacto deslizante.

El ensayo de bloque-deslizante consiste en aplicar una carga normal entre una muestra de prueba en forma de bloque y una superficie de deslizamiento, mientras se aplica un movimiento relativo entre ellos.

La norma ASTM G99 establece los parámetros clave del ensayo, como la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento, el diámetro y la geometría del anillo de deslizamiento, y el tiempo de ensayo. También proporciona orientación sobre la selección del lubricante y las condiciones ambientales durante el ensayo.

La evaluación del desgaste se realiza mediante mediciones precisas de la pérdida de masa, la profundidad del desgaste y otros parámetros relevantes. Estos resultados son utilizados para comparar la resistencia al desgaste de diferentes materiales, revestimientos o tratamientos superficiales, y para evaluar su idoneidad en aplicaciones específicas donde se requiere una alta resistencia al desgaste.

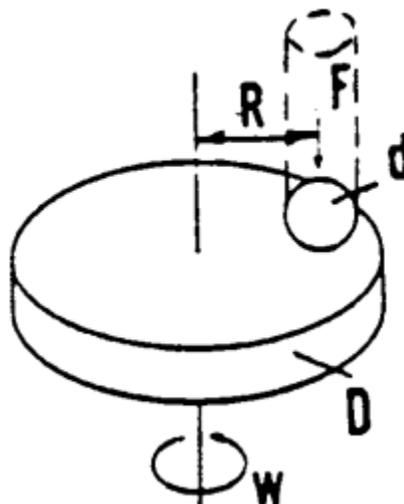


Figura 6. Esquema de la máquina de ensayo de desgaste [31]

3. Selección previa del material matriz

Como se mencionó anteriormente, en la instruida de los cojinetes las notables propiedades del cobre (además de la posibilidad de incrementarlas mediante su aleación con estaño o zinc), hace que los cojinetes base cobre se estén empleando ampliamente en aplicaciones aeroespaciales y automotrices, en aplicaciones industriales con grandes exigencias, sometidos a bajas velocidades y cargas pesadas, así como en máquinas utilizadas para la fabricación de hierro y acero, equipos para la industria alimentaria, máquinas de moldeo por inyección, equipos autopropulsados, maquinaria de movimiento de tierra, bombas y muchas otras industrias.

Un cojinete de bronce puede resistir mejor la fatiga, presentar una buena ductilidad, exhibir baja fricción contra otros metales y conducir el calor y la electricidad mejor que la mayoría de los aceros además de alcanzar una mayor resistencia al impacto, al desgaste y a la corrosión con relación a los fabricados de latón. A pesar de estas ventajas, requieren lubricación externa como grasa o aceite durante su instalación y funcionamiento para reducir la fricción y posterior desgaste.

Con el objeto de subsanar la falta de lubricación en cojinetes de bronce, se ha planteado el uso de materiales compuestos que contengan grafito a fin de generar cojinetes autolubricantes, esto debido a que cada vez es más frecuente el uso de grafito como lubricante debido a que este no deja residuos pegajosos que puedan atraer el polvo. De igual forma la adición de partículas carburo de silicio como refuerzo es muy utilizado debido al incremento en las propiedades mecánicas que genera [32-36].

Con esto en mente es necesario elegir entre la variedad de bronces cual se usará como matriz del composito por lo cual se proponen 3 tipos de bronces, los cuales fueron elegidos con base en la descripción de uso y características otorgadas por el fabricante [37] y la base de datos de materiales MatWeb y el programa ANSYS GRANTA 2023:

- Estándar [38]: Bronce fundido, también llamado “RAZA” es altamente maquinable para uso general, Herrajes en general, fundiciones ornamentales. suministros y accesorios de plomería, válvulas y accesorios de baja presión.
- SAE 62 [39]: Bronce al estaño, resistente al desgaste y al ataque químico ácido. Recomendado para piezas que requieren un bronce fino y muy estable, como coronas, engranes, flechas, elementos de máquinas, campanas, chumaceras, accesorios para vapor, etc.

- SAE 64 [40]: Bronce al plomo, recomendado para trabajos pesados de alta velocidad, carga y fuerte presión, especialmente para chumaceras y cojinetes usados con herramientas, máquinas, grúas, dragas, molinos, trituradoras, etc.

En la tabla 1 se muestra la composición química para cada una de las aleaciones [37-41].

Tabla 1. Composición química de materiales base.

Material \ Elemento	%Sn	%Zn	%Pb	%Ni	%Fe	Cu
Estándar	2.3 - 3.5	7 - 10	6 - 8	0.8	0.3	Balance
SAE 62	9 - 11	1 - 3	0 - 0.3	1	0.15	Balance
SAE 64	9 - 11	2.5 - 4	8 - 11	0.5	0.15	Balance

La tabla 2 contiene las propiedades mecánicas para cada aleación [38-41].

Tabla 2. Propiedades mecánicas de materiales base.

Propiedad\Aleación	Estándar	SAE 62	SAE 64
Dureza Brinell	55	75	60
Esfuerzo máximo [MPa]	235	310	240
Esfuerzo de cedencia [MPa]	105	150	125
Módulo de elasticidad [GPa]	90	105	95
Resistencia a la fatiga [MPa]	-	90	90

En el anexo 1 se encuentra información complementaria acerca de las propiedades mecánicas de cada una de las aleaciones.

4. Metodología de trabajo

Para la realización de este trabajo se siguieron varios pasos para la caracterización de cada uno de los materiales utilizados.

Se inicio con el proceso de ingeniería inversa, este consistió en la caracterización del cojinete muestra y las aleaciones de bronce consideradas para fungir como material base para la matriz del material compuesto para poder obtener información acerca de su proceso de fabricación, composición química y propiedades tribológicas.

Posteriormente se realizó la fabricación y caracterización de las probetas para determinar las mejores condiciones de trabajo para el proceso de fabricación.

Por último, se fabricaron y caracterizaron las probetas de material compuestos y con esto la medición

En la figura 7, se muestra los esquemas que representan de forma sencilla, las actividades realizadas durante el proceso experimental.

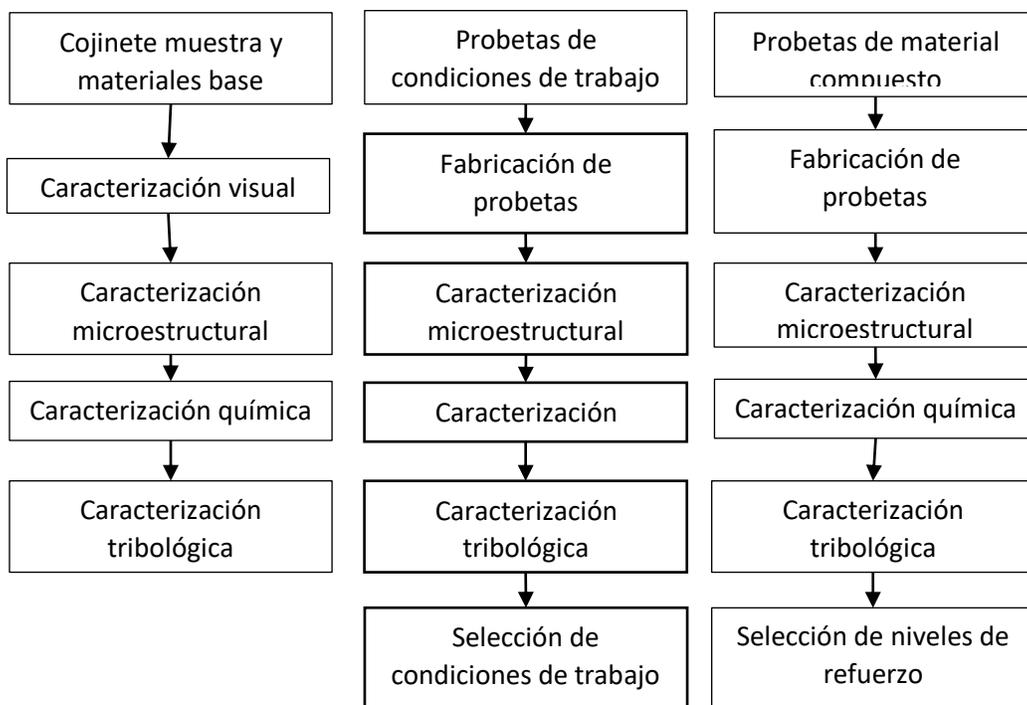


Figura 7. Metodología de trabajo

A continuación, se explica de manera general que se hizo durante las diferentes etapas de los procesos de caracterización, fabricación y selección.

4.1 Caracterización visual

Para la caracterización del cojinete muestra se inició con una inspección visual, la cual consistió en identificación de las características de las piezas muestra que se podían observar a simple vista, figura 8a.

4.1.1 Medición

Para poder caracterizar de manera más adecuada el cojinete muestra se midieron sus dimensiones, haciendo uso de un calibrador vernier, en la figura 8b se encuentra un esquema de cómo fue medida la pieza. Las mediciones promedio fueron registradas y sus valores se presentan en la Tabla 3.

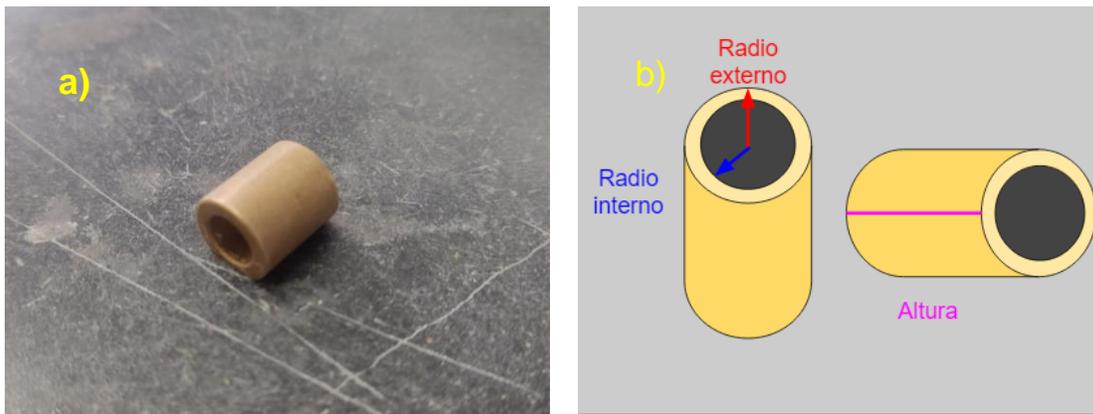


Figura 8. a) Cojinete muestra y b) Esquema de toma de medidas

Tabla 3. Medidas promedio de la pieza muestra

Radio Interno	Radio externo	Altura
6.92 [mm]	10.02 [mm]	12.02 mm]

4.1.2 Ensayo de líquidos penetrantes

Con la finalidad de obtener más información respecto a fallas superficiales que se presentan en los cojinetes y para destacar zonas de posible formación de grietas por deformado o para hallar algún defecto puntual, se procedió a realizar pruebas no destructivas mediante líquidos penetrantes.

En una superficie plana, se roció el cojinete con líquido penetrante previa limpieza superficial con líquido desengrasante como se observa en la figura 9. Se dejó actuar

el líquido penetrador por 10 minutos y posteriormente se limpió. Después, se aplicó revelador a la pieza y finalmente, la muestra fue observada y analizada.

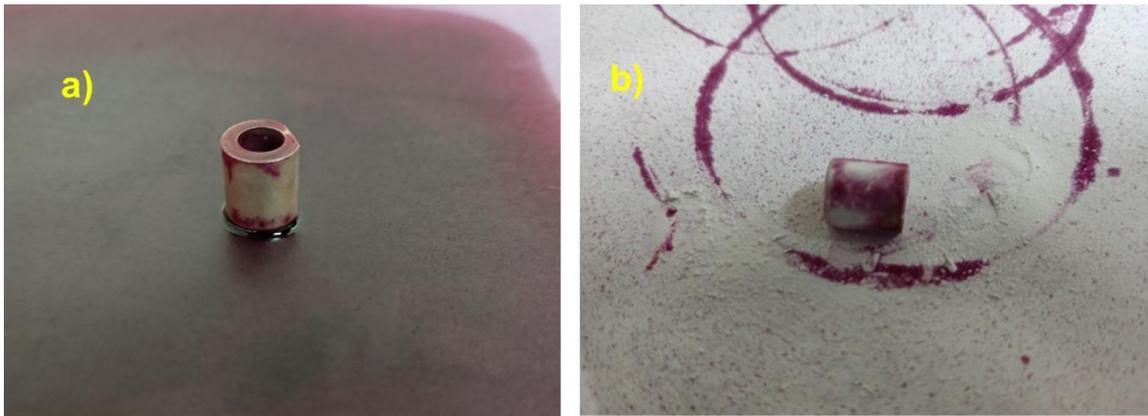


Figura 9. Líquidos penetrantes a) Limpieza b) Revelador

4.2 Caracterización microestructural

Todas las piezas utilizadas durante el proyecto fueron preparadas para su caracterización microestructural mediante un proceso que incluyó el emparejamiento de superficies utilizando una desbastadora de banda “KN BD-46B/12696” con lija de grano 80, seguido de una preparación metalográfica que involucró desbaste con lijas de diferentes granos (240, 320, 400, 600 y 1000), pulido grueso y fino con Al_2O_3 como abrasivo. Después del pulido, se limpiaron las muestras con acetona y un baño ultrasónico durante 900 segundos, y finalmente se atacaron utilizando una solución de FeCl_3 , CuCl_2 , FeCl_3 y HNO_3 . Figura 10.



Figura 10. a) Lijas y Paños b) Desbastadora

Para la observación microestructural de las muestras, se emplearon técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Para el análisis con

microscopio óptico “OLYMPUS PMG 3” (MO), se obtuvieron imágenes a aumentos de 10x y 20x, mientras que para el análisis con microscopio electrónico de barrido “JEOL JCM-6000 NeoScope” (MEB), con el que se capturaron imágenes a aumentos de 100x y 500x. Figura 11.



Figura 11. Microscopios a) MO y b) MEB

4.3 Caracterización química

A fin de contar con una composición base que represente un punto de partida y pueda posteriormente compararse con los materiales a utilizar en la fabricación de probetas de material compuesto (tabla 1) se realizó un análisis de la composición de la pieza muestra y los materiales base para la matriz por medio de espectrometría de plasma de masas (ICP). Figura 12a.

Para realizar el análisis fue necesario la recolección de polvo de los diferentes materiales, por lo cual se hizo uso de un banco de trabajo.

Para poder determinar los perfiles de contracción de los diferentes elementos presentes en el cojinete muestra y las probetas producidas se hizo uso de la técnica Espectroscopía de energía dispersiva (EDS).

El análisis por EDS acoplado a un microscopio electrónico de barrido se llevó a cabo con un equipo Jeol como se aprecia en la figura 10. En este método se tomaron dos tipos de análisis: lineal y mapeo. En el análisis por mapeo se obtuvieron los gradientes de concentración en una determinada área de la pieza, mientras que el análisis lineal, proporcionó los perfiles de concentración de los elementos presentes a lo largo de una línea recta que atraviesa una determinada longitud en el área de trabajo seleccionada.



Figura 12. Equipo de trabajo: a) Banco de trabajo y b) ICP

4.4 Caracterización tribológica

Para poder caracterizar el comportamiento tribológico, específicamente la velocidad de desgaste de cada una de las muestras se realizó un ensayo de desgaste siguiendo lo indicado en la norma ASTM G99 [31]. La máquina de desgaste empleada se muestra en la figura 7a y los parámetros de operación se presentan en la tabla 4. El cambio de masa fue medido usando una balanza analítica “Ohaus CP214” de 4 dígitos (Figura 13b); los datos recolectados durante el ensayo fueron registrados y posteriormente graficados.

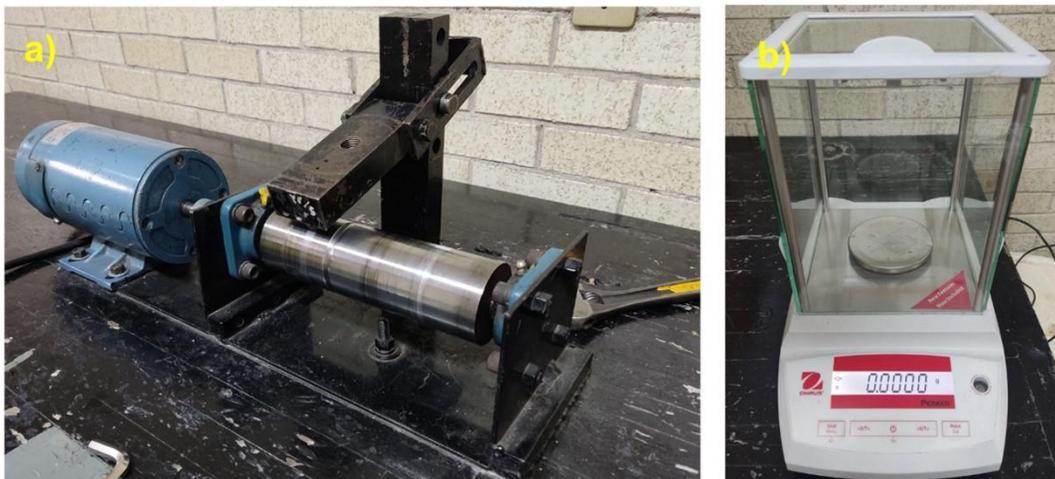


Figura 13. Equipo de ensayo de desgaste a) Máquina de Desgaste b) Balanza Analítica

Tabla 4. Parámetros del ensayo de desgaste.

Parámetro	Valor
Velocidad Angular	900 [rpm]
Carga	4.95 [kg]
Intervalos de tiempo	10 [min]
Tiempo de ensayo	1 [h]* y 4 [h]**

*Determinación de condiciones de trabajo.

**Determinación de niveles de refuerzo.

4.5 Fabricación de probetas (Pulvimetalurgia)

La fabricación del material compuesto se realizó por la vía sólida de metalurgia de polvos. El propósito inicial fue determinar dentro de 3 aleaciones comerciales de partida (mostradas en la tabla 1), la matriz que permite producir el compuesto con la mejor continuidad matriz-refuerzo, la menor oxidación, la mejor incorporación del refuerzo y finalmente, la menor pérdida de masa durante la prueba de desgaste.

Como material base se utilizó bronce estándar y como material reforzante se emplearon partículas de grafito y de carburo de silicio (SiC_p). Las muestras obtenidas son probetas cilíndricas con dimensiones de $\frac{1}{2}$ [in] de diámetro y $\frac{1}{2}$ [in] de altura.

Previo a la fabricación del compuesto fue necesario realizar cálculos pertinentes* con el propósito de obtener la masa necesaria para cada una de las probetas a fabricar contemplando un reforzamiento del 1%, 2% y 3% en masa de partículas de grafito. Posteriormente con los datos recabados se fijó el porcentaje de grafito en un 2% en masa (este valor se obtuvo después de analizar los datos arrojados por el ensayo de desgaste de las probetas fabricados con grafito) y se fabricaron probetas agregando carburo de silicio considerando 1%, 3% y 5% en masa de este refuerzo. Los valores obtenidos para cada uno de los niveles se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Masas calculadas.

<i>Sin refuerzo</i>		
Porcentaje de grafito	Masa de Grafito [g]	Masa de Bronce [g]
0%	0	14.4148
1%	0.0356	14.2707
2%	0.0730	14.1265
3%	0.1096	13.9824

<i>2% Grafito fijo</i>		
Porcentaje de grafito	Masa de SiC [g]	Masa de Bronce [g]
1%	0.0516	13.9824
3%	0.1549	13.6941
5%	0.2582rrt	13.4058

**Un ejemplo de cómo se realizaron los cálculos se encuentra en el Anexo 1.

En la figura 14 se aprecian los polvos metálicos de bronce estándar empleados en la fabricación de los composites. Una vez caracterizados químicamente y a partir de los cálculos realizados para cada probeta, se pesaron y se registró la masa necesaria para cada caso, Anexo 2.

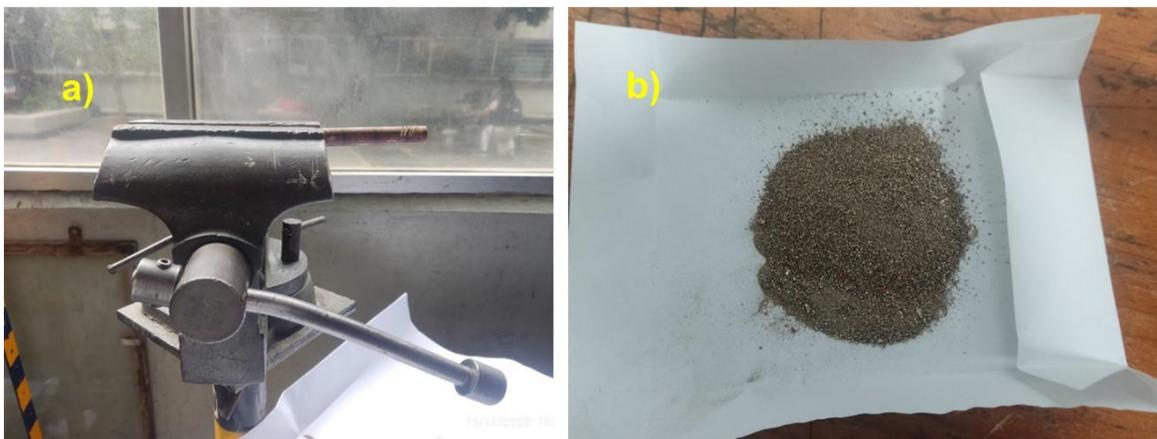


Figura 14. Equipo de ensayo de desgaste a) Maquina de Desgaste b) Balanza Analítica

Los polvos pesados fueron agregados a tubos de almacenamiento y posteriormente se llevaron a una mezcladora (figura 15b). El proceso de mezclado se llevó a cabo a una velocidad angular de 150 [rpm] por intervalos de 20 [min] en un tiempo total de 90 [min]. Una vez mezclados, los polvos se compactaron haciendo uso de una maquina universal para ensayos mecánicos “MTS 810” con un sistema de adquisición Testlink 2.0 (y una máquina de universal para ensayos mecánicos “Mohr & Federhaff Losenhausen” (figura 15a). Las probetas en verde obtenidas fueron llevadas a una mufla “THERMOLYNE” y sometidas al proceso de sinterización (Figura 15c). Las variables del proceso modificaciones sus se encuentran descritas

en el apartado 4.5.1 Recubrimiento y 4.6 Selección de condiciones de trabajo y niveles de refuerzo.



Figura 15. Equipo para pulvimetalurgia a) Maquina universal b) Mezcladora c) Mufia

4.5.1 Recubrimiento

Las probetas usadas para la determinación condiciones de trabajo presentaron una capa de óxido la cual provoco serios problemas en la formación y continuidad del material. Para evitar la oxidación de las siguientes probetas se propuso el aplicar una capa de recubrimiento sumergiendo las probetas en verde (piezas posteriores al proceso de compactación) en una solución de CuSO_4 por 15 minutos con

agitación vigorosa, figura 16. Este proceso se realizó Previo a la etapa de sinterizado.

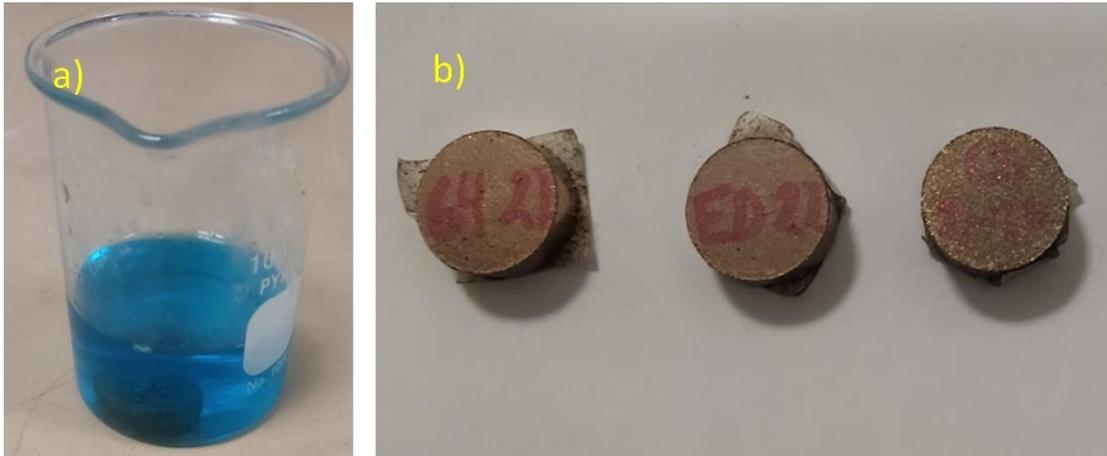


Figura 16. a) Solución de CuSO_4 y b) Probetas en verde recubiertas

4.6 Selección de condiciones de trabajo

Para encontrar los mejores parámetros para las etapas de compresión y sinterizado de las probetas se probaron diferentes condiciones de trabajo. En la tabla 6 se muestran las variaciones que sufrieron los siguientes parámetros: carga de compresión, tiempo de sinterizado y temperatura de sinterizado. Se eligieron estos parámetros debido al efecto que tienen en la correcta formación y la continuidad del compuesto. A continuación, se detalla punto a punto la importancia que tiene cada parámetro.

La carga aplicada tiene dos funciones muy importantes, primero al comprimir los polvos su volumen disminuye y ya que la masa no se modifica, la probeta en verde aumenta su densidad lo que da como resultado el aumento en la dureza y la resistencia del material. En segundo lugar, pero de igual importancia: mejorar la cohesión entre las partículas, esto es provocado a que al momento de la compactación se promueve la unión entre las partículas que conforman el polvo lo que ayuda a establecer una estructura coherente y una conexión adecuada entre las partículas lo que deriva en el aumento de la resistencia y la estabilidad del material.

Por otro lado, el tiempo y la temperatura de sinterizado son parámetros cruciales para el proceso de sinterizado esto se debe al efecto que tienen sobre la calidad final de las probetas. Es importante mencionar que ambos parámetros dependen el uno del otro por lo que se deben buscar los valores adecuados que generen una sinergia que vaya acorde a los resultados esperados.

Una temperatura y tiempo de sinterizado adecuados derivarán en la correcta difusión de los polvos lo cual se ve traducido en una reducción de la porosidad, de manera paralela se generará una buena contracción de las partículas lo que en conjunto se convierte en la reducción de los poros de la pieza final y por lo tanto en el aumento de las propiedades mecánicas y tribológicas.

Además, durante el proceso de sinterizado las partículas se funden parcialmente generando la unión de las partículas. Una baja temperatura o tiempo de sinterizado producirá una mala difusión y unión de las partículas y lo que puede resultar en una estructura desigual o heterogénea en las piezas sinterizadas.

Otro factor en el que influye la temperatura de sinterizado es la recristalización del material y el crecimiento de los granos en la microestructura del material, elegir una mala temperatura derivara en crecimiento excesivo de los granos lo que puede afectar negativamente las propiedades mecánicas del material.

Tabla 6. Parámetros para compresión y sinterizado.

Probeta	Compresión	Sinterizado	
	Carga aplicada [kN]	Tiempo de sinterizado [h]	Temperatura de sinterizado [°C]
1	172	3	850
2	200	2	800
3	230	1	800
4	172	4	700

Las temperaturas y tiempos de sinterizados se eligieron con base en la literatura [27, 28] y de los artículos consultados [32-36].

4.7 Selección de material base

A partir de las condiciones de trabajo y la aplicación del recubrimiento descrito en la sección 4.5.1 se fabricaron probetas blanco con los 3 materiales propuestos para determinar el mejor material base para matriz la matriz del compuesto.

4.8 Selección de niveles de refuerzo

Para poder determinar los mejores niveles de reforzamiento se probaron probetas con diferentes composiciones matriz-refuerzo, siendo estos 1, 2 y 3% correspondientes a partículas de gratio y 1, 3 y 5 de partículas de carburo de silicio, esto valores se planearon con base en lo reportado en los artículos consultados [32-36].

5. Resultados y análisis

Para poder entender y realizar un mejor análisis de resultados, estos se dividieron en dos apartados. El primero es la caracterización del cojinete muestra sumado a la selección del material y parámetros de operación, a este primer parte se le denominó como “Ingeniería inversa”. El segundo apartado con el nombre de “Material compuesto” corresponde a la evaluación de los diferentes niveles de refuerzo de grafito y grafito con carburo de silicio.

5.1 Ingeniería inversa, selección de condiciones de trabajo y material base.

Los siguientes resultados abarcan la caracterización microestructural, química y tribológica del cojinete muestra y de las probetas para la selección del material y las condiciones de trabajo.

5.1.1 Micrografías.

Las metalografías obtenidas a través de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido proporcionan información y permiten realizar una comparación acerca de la microestructura de los diferentes materiales utilizados durante la elaboración de este proyecto.

Para realizar una mejor comparación se realizó una búsqueda de la literatura en donde se obtuvo la figura 17 la cual corresponde a un material compuesto base cobre reforzado con partículas de grafito y producido por pulvimetalurgia. Es importante destacar que es imagen fúne principalmente como un referente de una microestructura de sinterizado que está caracterizada por las regiones oscuras de formas irregulares las cuales corresponde a la zona inter particular o porosidades producidas por el proceso de fabricación.

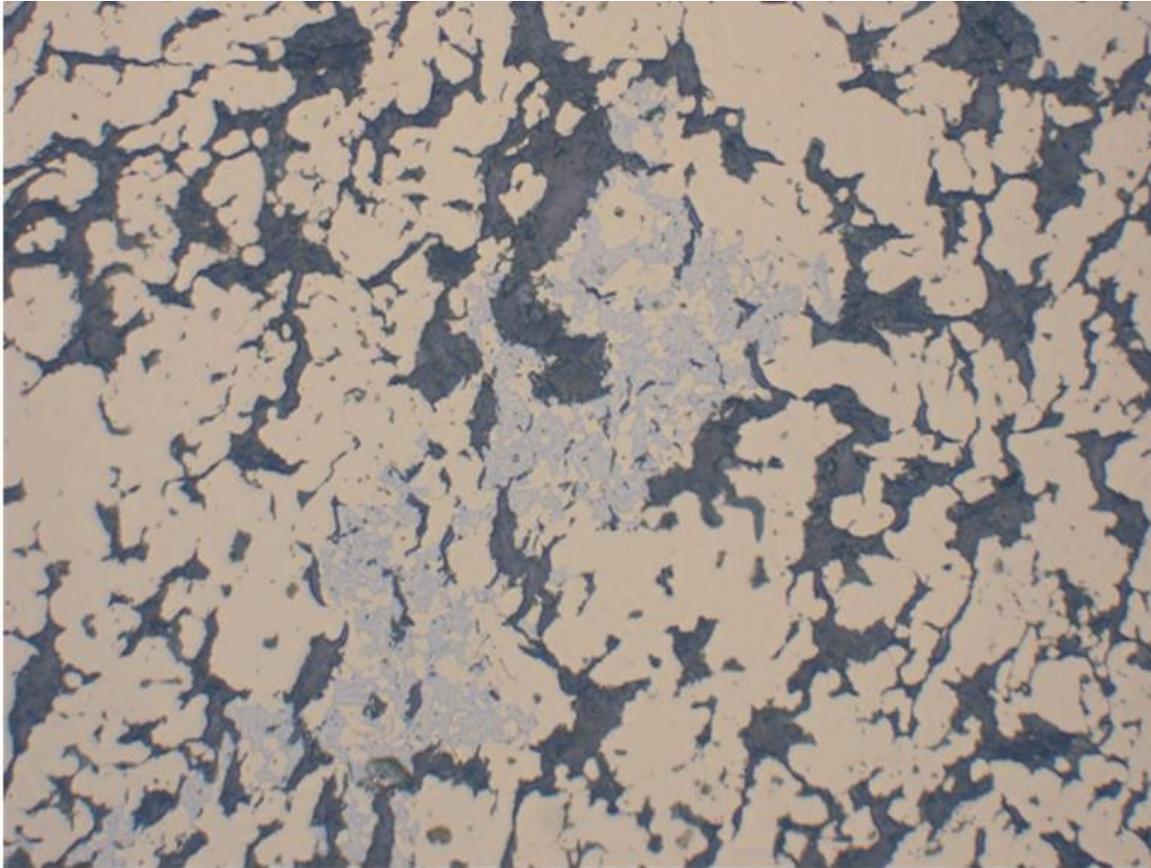


Figura 17. Microestructura material compuesto base cobre reforzado con grafito producido por pulvimetalurgia a 500x [42].

5.1.1.1 Cojinete

Las micrografías obtenidas del cojinete comercial por microscopía óptica se muestran en la figura 18 en donde se distingue la matriz (bronce) y zonas oscuras de diferentes diámetros. Al comparar esta microestructura con la literatura (figura 17) se hace notoria una gran similitud, donde destacan el mismo tipo de regiones oscuras (en la figura 18b se pueden apreciar mejor). A partir de esto se concluye que el cojinete comercial fue producido por pulvimetalurgia y por lo tanto estas regiones corresponden a los defectos producidos por el mismo proceso de pulvimetalurgia.

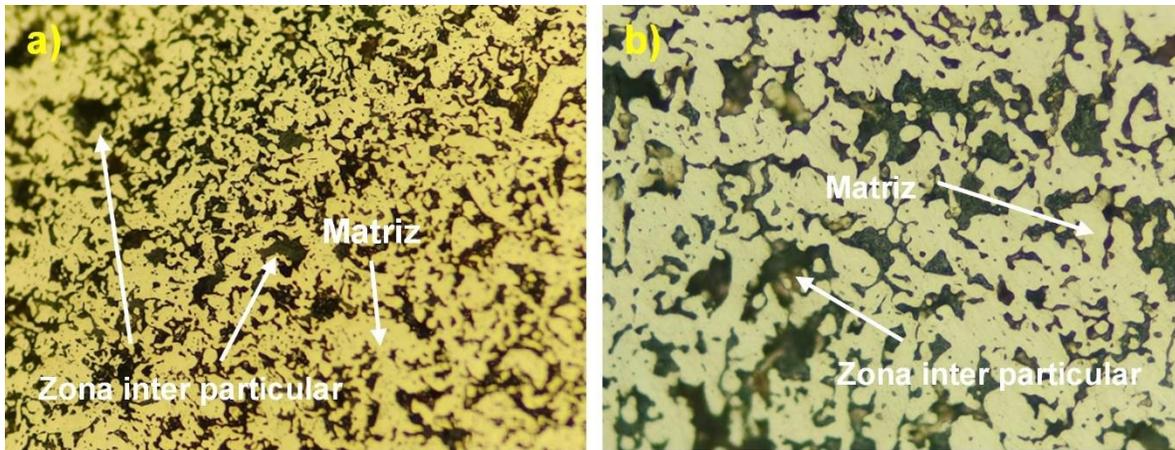


Figura 18. Micrografías de Cojinete muestra tomadas por MO a) 10x b) 20x

En la figura 19 se tienen las micrografías del cojinete muestra tomadas por el MEB, en las cuales se puede ver con mayor detalle su microestructura. Para el apartado a) se vuelve a observar una gran cantidad de zonas oscuras, debido a que las micrografías fueron tomadas con electrones retro dispersados, estas zonas pueden pertenecer a elementos de bajo peso atómico o lo que es más probable, porosidades en la matriz, adicionalmente se distinguen pequeñas zonas grises que pueden corresponder a los elementos aleantes como el Pb o el Zn.

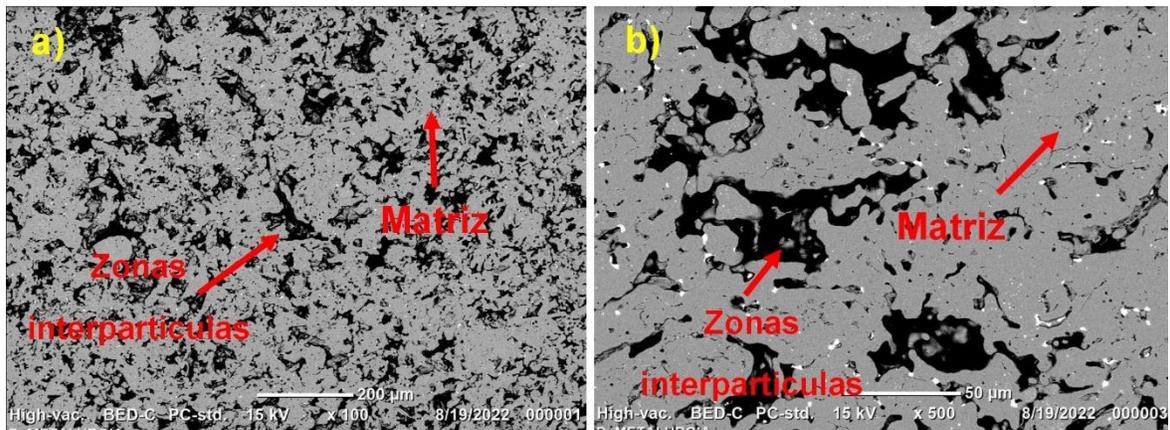


Figura 19. Micrografías de Cojinete muestra tomadas por MEB a) 100x b) 500x

5.1.1.2 Materiales base

Las siguientes micrografías corresponden a los materiales seleccionados como posible matriz del compuesto.

En la Figura 20, se presenta la microestructura del bronce estándar. En el apartado a), es posible apreciar los granos del material y lo que parecen ser dendritas, en

aumentos más alto, inciso b), ya no se distinguen los granos del material, pero si permite corroborar que el material presenta una estructura dendrítica que de forma cualitativa será fina.

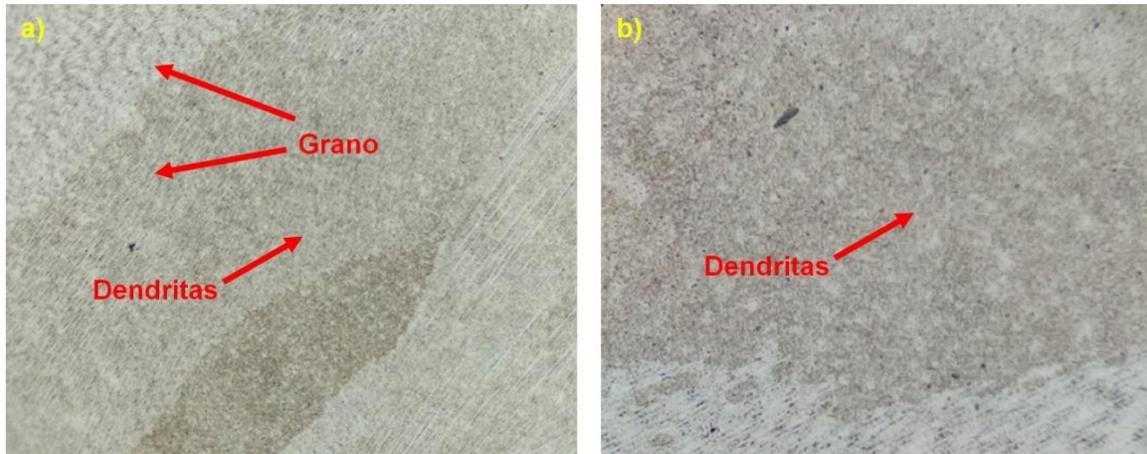


Figura 20. Micrografías de Material Estándar con Microscopio óptico a) 10x b) 20x

La microestructura del material SAE 62 se encuentra en la figura 21. El inciso a) a 10 aumentos, muestra una estructura dendrítica y a manera de corroboración se tiene el inciso b) donde a un mayor aumento se definen mejor las dendritas.

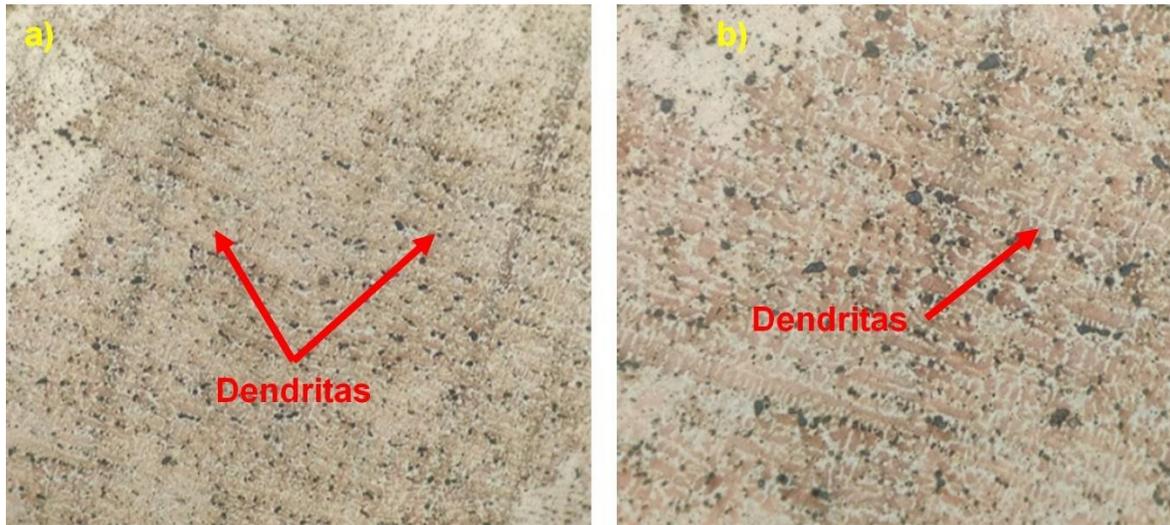


Figura 21. Micrografías Matriz SAE 62 a) 10x b) 20x

En las micrografías de la figura 22, se observa la microestructura de la aleación SAE 64. Al observar a 10 aumentos (inciso a)), se visualizan los granos del material y de manera tenue se pueden distinguir dendritas, a mayores aumentos inciso b) las dendritas se distinguen de manera clara.

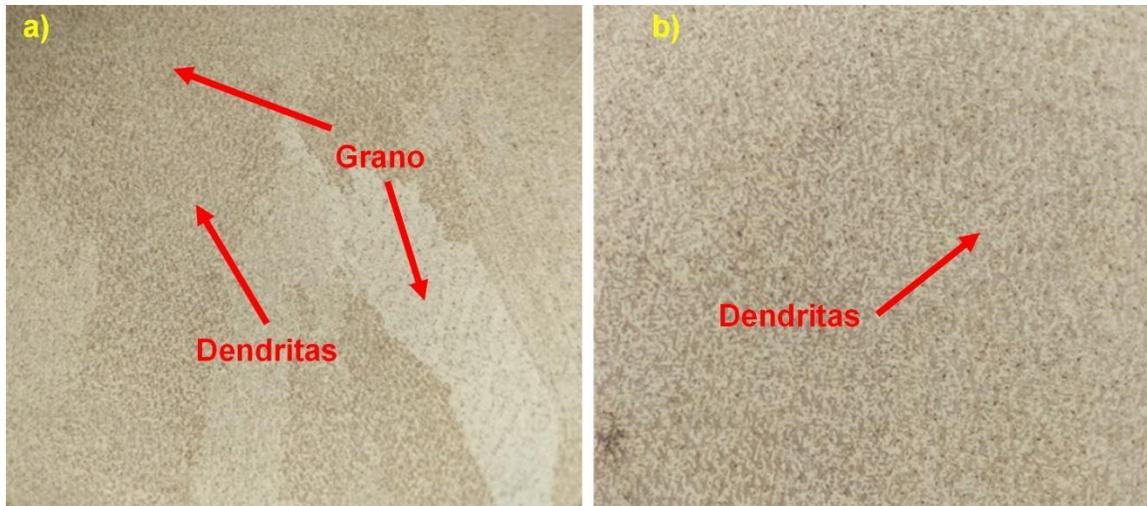


Figura 22. Micrografías Matriz SAE 64 a) 10x b) 20x

Al comparar las microestructuras de los tres bronce se destaca que en los tres casos se tiene una estructura dendrítica, lo que implica que estos materiales son productos de un proceso de colada. De forma más detallada las aleaciones SAE 64 y estándar presentaron una microestructura más fina, además para ambos casos se reveló la macroestructura distinguiéndose con variaciones de tonos los diferentes granos del material, mientras que la aleación SAE 62 figuraban dendritas de un mayor tamaño y en esta no se reveló su macroestructura.

5.1.1.3 Probetas de condiciones de trabajo

Como se menciona en el apartado 4.6 se fabricaron probetas para determinar las condiciones de trabajo óptimas para la producción del compuesto, las siguientes micrografías corresponde a las probetas obtenidas por las diferentes condiciones de trabajo plantadas.

En la figura 23 se encuentran las microestructuras sin atacar correspondientes a las cuatro condiciones de trabajo propuestas lo que permite comparar y analizar la continuidad de la matriz obtenida, una mala continuidad da como resultado anisotropía de las propiedades mecánicas y tribológicas además de fallas en el material.

En la figura 23a se muestra la micrografía correspondiente a las condiciones de trabajo 1 en la que se observa una alta cantidad de zonas inter-partículas. De manera puntual se observan grandes variaciones del tamaño de las zonas inter-partículas si también en su morfología pudiendo dividir en dos tipos los defectos observados: porosidades con morfologías de hojuelas irregulares y, por otro lado, zonas “lineales” que podrían indicar una mala unión entre las partículas.

Adicionalmente a esto, las diferentes zonas presentan mucha variación respecto a sus tamaños.

La micrografía que muestra los resultados de las condiciones de trabajo 2 se encuentra en la figura 23b. Aquí también se puede observar una alta cantidad de porosidades y zonas de mala unión, sin embargo, el tamaño de zonas interpartículas es mucho más homogéneo.

Para las condiciones de trabajo 3 la figura 23c muestra los resultados obtenidos, en donde la cantidad de porosidades es mayor respecto a las otras dos condiciones, pero las zonas de mala unión son menores.

Las condiciones de trabajo 4 presentaron la oxidación casi total de la probeta como se observa en la figura 23d.

Al analizar y comparar las micrografías de las cuatro condiciones de trabajo es posible descartar desde este punto las condiciones de trabajo 4, esto debido a que la oxidación producida es tan elevada que ni siquiera llega a formarse el composito. Respecto a las otras 3 condiciones de trabajo contienen elementos similares en sus micrografías, presentando los 3 casos una alta cantidad de zonas interarticular semejante a la del cojinete muestra (figura 18a).

Con la intención de corroborar lo anterior se realizó un conteo de estas regiones para cada una de las probetas y el cojinete muestra utilizando el programa Image Pro-Plus (IPP), los resultados del conteo se encuentran registrados en el Anexo 4. Con estos resultados se logró encontrar que las condiciones de trabajo 3 son las que muestran una menor cantidad de zonas interpartículas y con esto podría decirse que también una mejor continuidad.

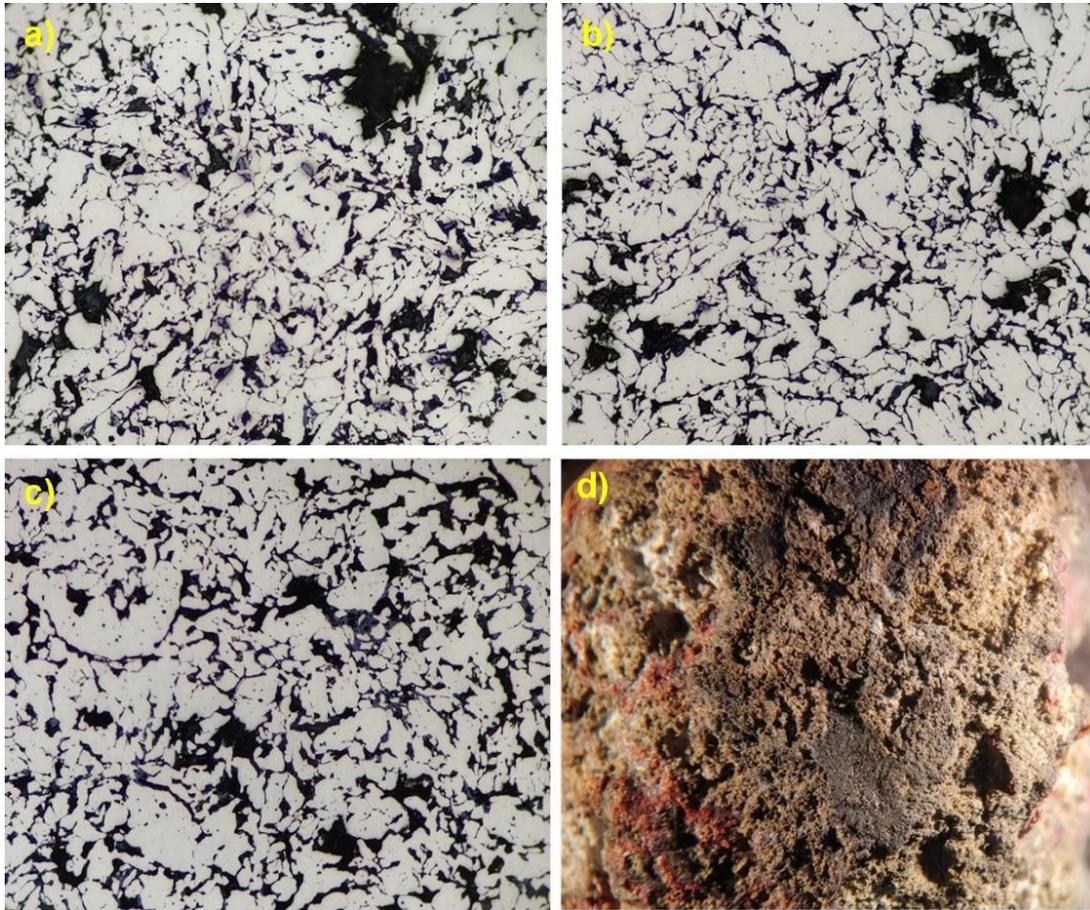


Figura 23. Micrografías Pulvimetalurgia 20x a) Condiciones 1 b) Condiciones 2 c) Condiciones 3; Micrografía Estereográfica d) Condiciones 4

Por otro lado, la figura 24, presenta las micrografías obtenidas a través de MEB, estas imágenes, permiten obtener información sobre los detalles del material. Es importante mencionar que estas imágenes fueron tomadas con electrones retro dispersados (SED), cuya característica es mostrar con diferentes contrastes en la escala de grises la distribución de la densidad atómica en el material, siendo las zonas más oscuras, huecos o elementos de bajo peso atómico, las zonas grises elementos de peso atómico medio y las zonas blancas zonas un alto peso atómico.

La figura 24a contiene la micrografía del cojinete muestra, al igual que la imagen tomada en el microscopio óptico se puede observar la característica estructura de sinterizado, presentando una gran porosidad.

Por su parte la figura 24b muestra de igual manera una estructura de sinterizado, pero a diferencia del cojinete muestra, esta imagen contiene múltiples contrastes, por un lado, el gris que corresponde a la matriz del material, el negro que

corresponde a las porosidades y el blanco que si se compara con las figura 24a correspondería también a la zona inter-partículas, esto quiere decir y con base en que se utilizaron SED que en estas zonas inter-partículas se encuentra segregado un elemento químico con un peso atómico mayor al de la matriz.

Este mismo fenómeno se presenta para las condiciones de trabajo 2 y 3 (figuras 24b y 24c) en donde se observan zonas blancas que corresponden a la región inter-particular.

Independiente al fenómeno de la segregación, la figura 24d ayuda a confirmar que las condiciones de trabajo 3 son las que presentan una mejor continuidad, presentando menos zonas inter-partículas, además de una mayor homogeneidad en la morfología de estas regiones.

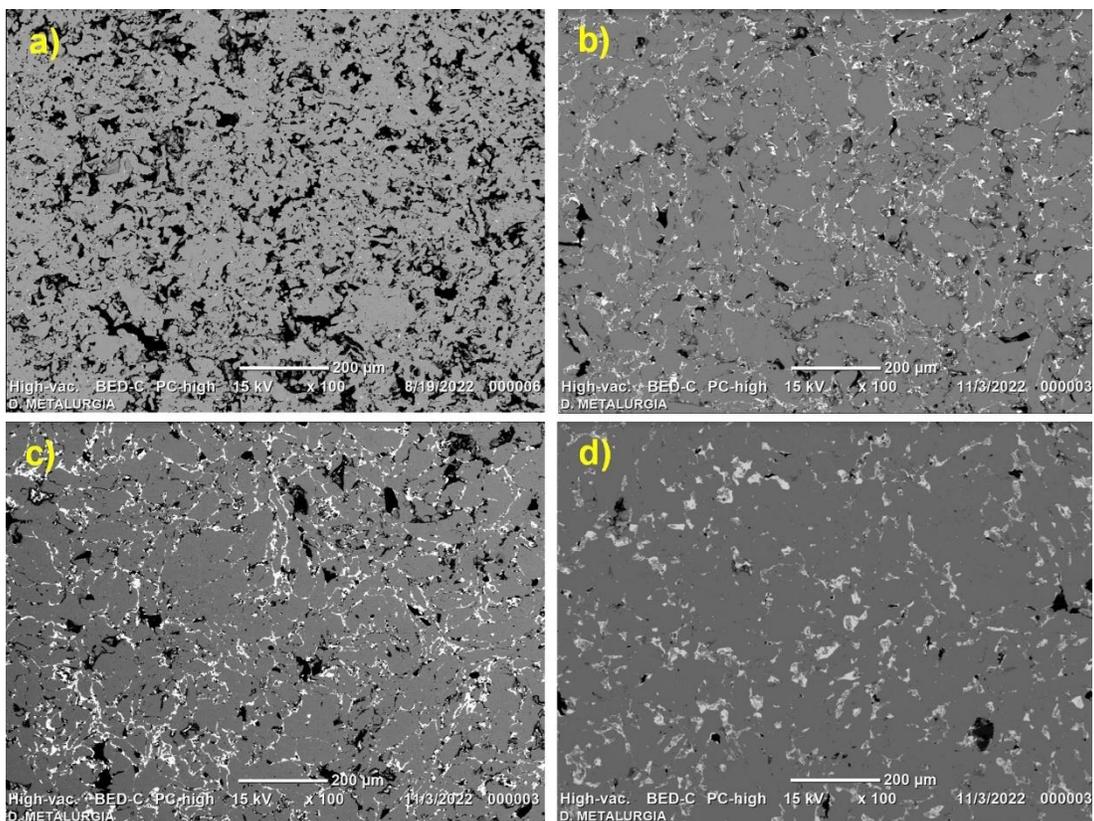


Figura 24. Micrografías tomadas por MEB 100x a) Cojinete muestra b) Condiciones 1 c) Condiciones 2 d) Condiciones 3

5.1.2 Análisis químico

La información obtenida a través de los diferentes análisis químicos realizados se muestra en los siguientes resultados.

5.1.2.1 Espectrometría de masas de plasma (ICP)

En la tabla 7, se muestran los porcentajes de elementos aleantes presentes para cada pieza. Estos datos permiten en primera instancia el evaluar los cambios entre los valores reportados (tabla 3) con los valores arrojados por el análisis.

El material estándar presenta variaciones notables en su composición teniendo un casi 3.5% de Sn más y un 4% de Zn menos del límite máximo y mínimo respectivamente. Respecto a los otros elementos, el Pb se encuentra cerca del rango mientras que el Fe y el Ni se encuentran por debajo del máximo permitido. Al hacer una revisión en la literatura se encontró que esta composición se encuentra más acorde a la de un bronce SAE 660 también conocido como bronce al plomo.

Respecto al bronce SAE 64 tiene niveles de Zn, Ni y Fe por encima del máximo aceptado, mientras que el Pb se encuentra muy por debajo del rango, para esta aleación solo el Sn se encuentra dentro de los límites establecidos por el fabricante.

La aleación SAE 62 es la que presenta una composición dentro de los rangos, teniendo elementos como el Sn, Zn y Pb dentro de los rangos, mientras que el Ni y Fe se encuentran por debajo del máximo.

El que los valores estén fuera de los rangos máximos y mínimos puede generar la modificación en las propiedades mecánicas y su estructura cristalina, además de que puede causar problemas al momento de realizar procesos alternos con el material.

Tabla 7. Resultados análisis ICP

Material	Elemento %					
	Sn	Zn	Pb	Ni	Fe	Cu
Estándar	6.938	3.880	5.839	0.212	0.184	Balance
SAE 62	9.11	1.026	0.200	0.057	0.106	Balance
SAE 64	9.15	6.311	4.512	0.873	0.206	Balance
Cojinete Muestra	5.9	5.0	3.023	0.3	0.4	Balance

5.1.2.2 Espectrometría de Rayos X Característicos (EDS)

El análisis químico por rayos x característicos permite a través de sus diferentes modos, caracterizar la homogeneidad, segregación o concentración de los elementos aleantes en una zona específica de un material.

Los siguientes resultados muestran los análisis lineales y por mapeo realizados al cojinete muestra y las probetas de las condiciones de trabajo, estos resultados permiten el comparar la distribución de los elementos presentes en cada probeta, además de obtener más información sobre el fenómeno del contraste blanco observado en la figura 24.

La figura 25 se corresponde los resultados del cojinete muestra. En la figura 25a se muestra el análisis por mapeo, en donde se visualiza que las zonas oscuras no se encuentra concentración de ningún elemento lo que significa que estas regiones corresponden a porosidades, por otro lado, se tiene una dispersión homogénea de los elementos aleantes, esto es corroborado por el análisis lineal (figura 25b), debido a que en este análisis se muestra que cuando la línea pasa por un zona oscura no se presenta pico de intensidad de ningún elemento, contrario a cuando toca alguna zona gris donde si se observa una variación en el gráfico.

Los resultados para el análisis por mapeo de las condiciones de trabajo 1 se encuentra en la figura 26a. En esta imagen se exhibe la segregación de los elementos Pb y el Zn, alojados en la zona inter particular del material. Nuevamente el análisis lineal ayuda a confirmar esto, mostrando que cuando la línea pasa por las zonas blancas se elevan los picos de intensidad del Pb y del Zn, mientras que, en las zonas grises, predomina el Cu y los demás elementos aleantes (figura 26b).

Las figuras 27a y 28a corresponden al análisis por mapeo para las condiciones de trabajo dos y tres respectivamente, al igual que para las condiciones de trabajo uno, en este análisis se puede observar la segregación localizada del Pb y del Zn en las regiones inter-partículas. Lo mismo sucede para sus análisis lineales (figuras 27b y 28b) donde la línea al intersectar con las zonas blancas se disparan los picos de Pb y Zn.

En conjunto estos resultados generan información importante con la que se confirma que en la figura 24, las zonas blancas corresponden a la región inter particular en donde se está teniendo una segregación localizada de los elementos Zn y Pb. Este fenómeno puede ser causado a diversos factores entre los que destacan: la diferencia entre los puntos de fusión y la insolubilidad entre el Cu y Pb y ambos puede estar ligados a la porosidad del material. Para poder hacer un análisis más detallado y determinar los factores involucrados es necesario revisar los resultados de las pruebas tribológicas.

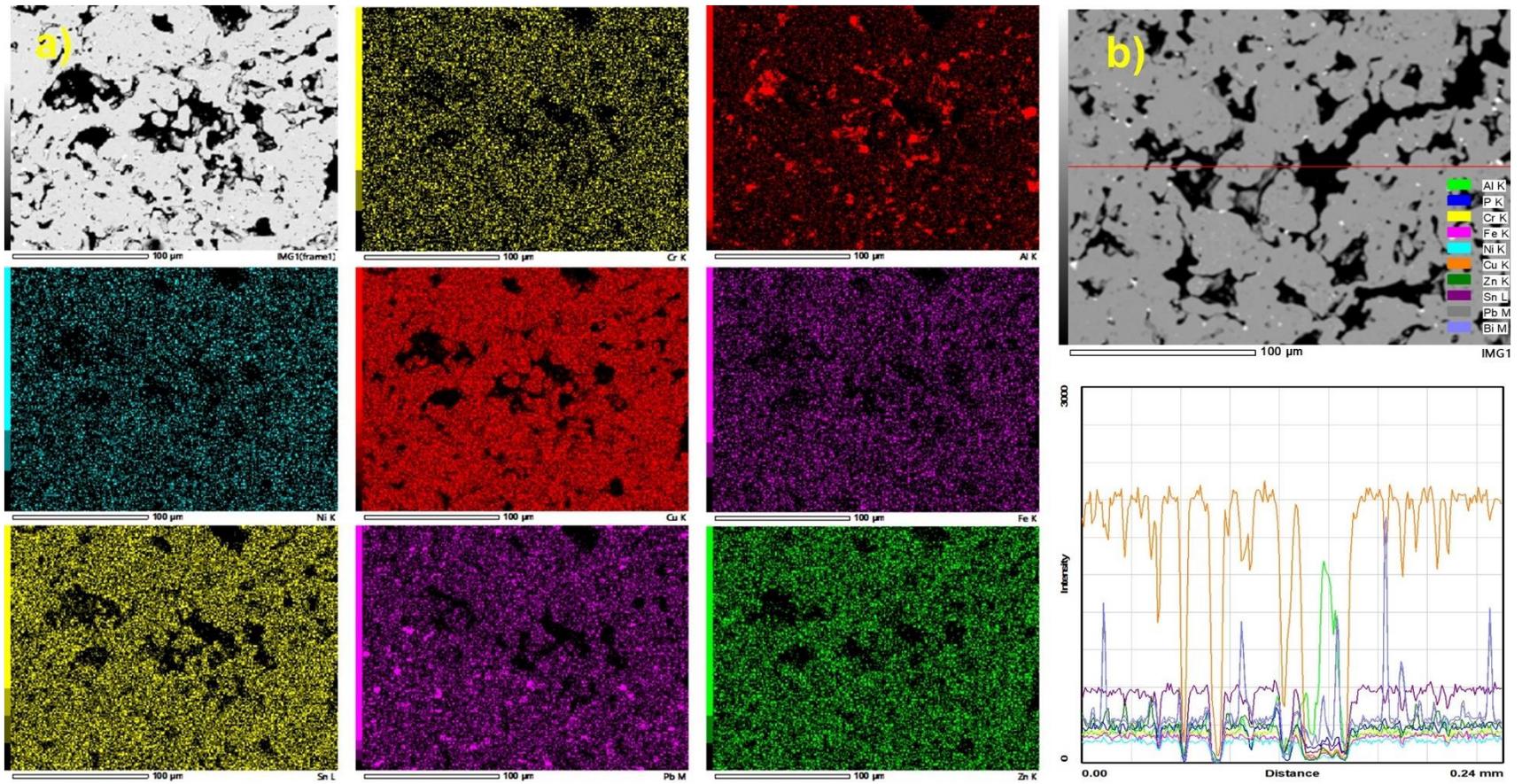


Figura 25. Resultados análisis EDS Cojinete muestra a) Mapeo b) Lineal

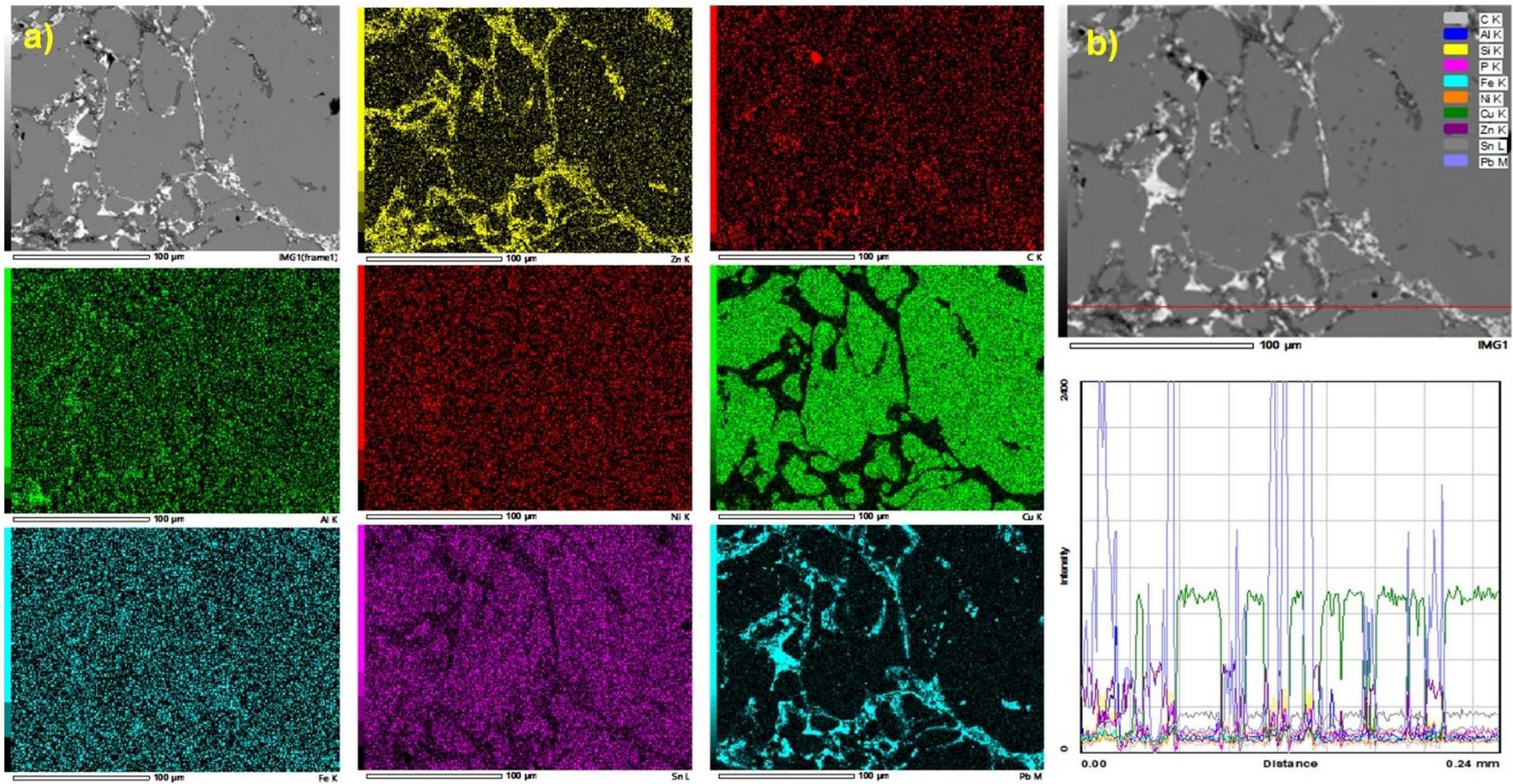


Figura 26. Resultados análisis EDS C1 a) Mapeo b) Lineal

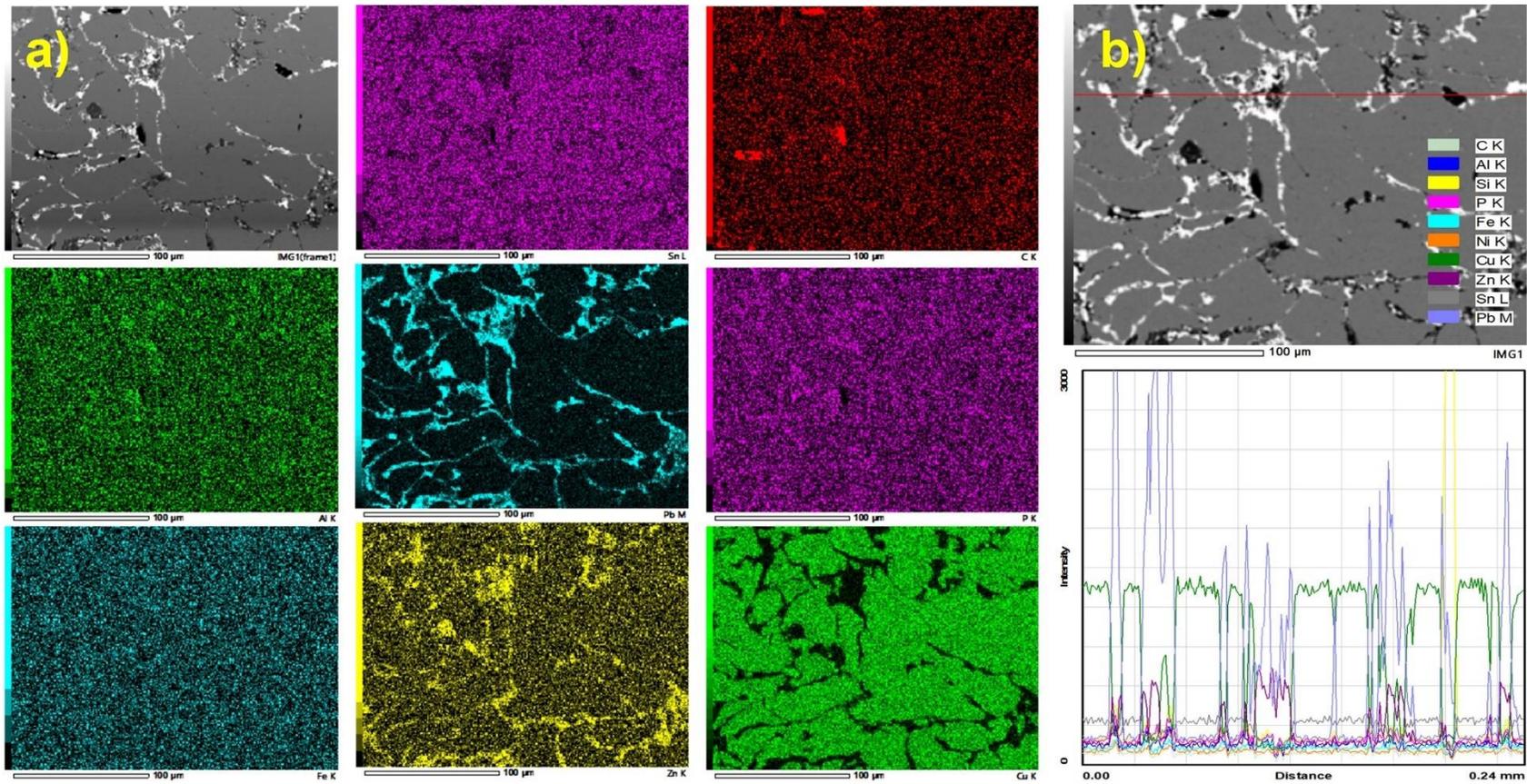


Figura 27. Resultados análisis EDS C2 a) Mapeo b) Lineal

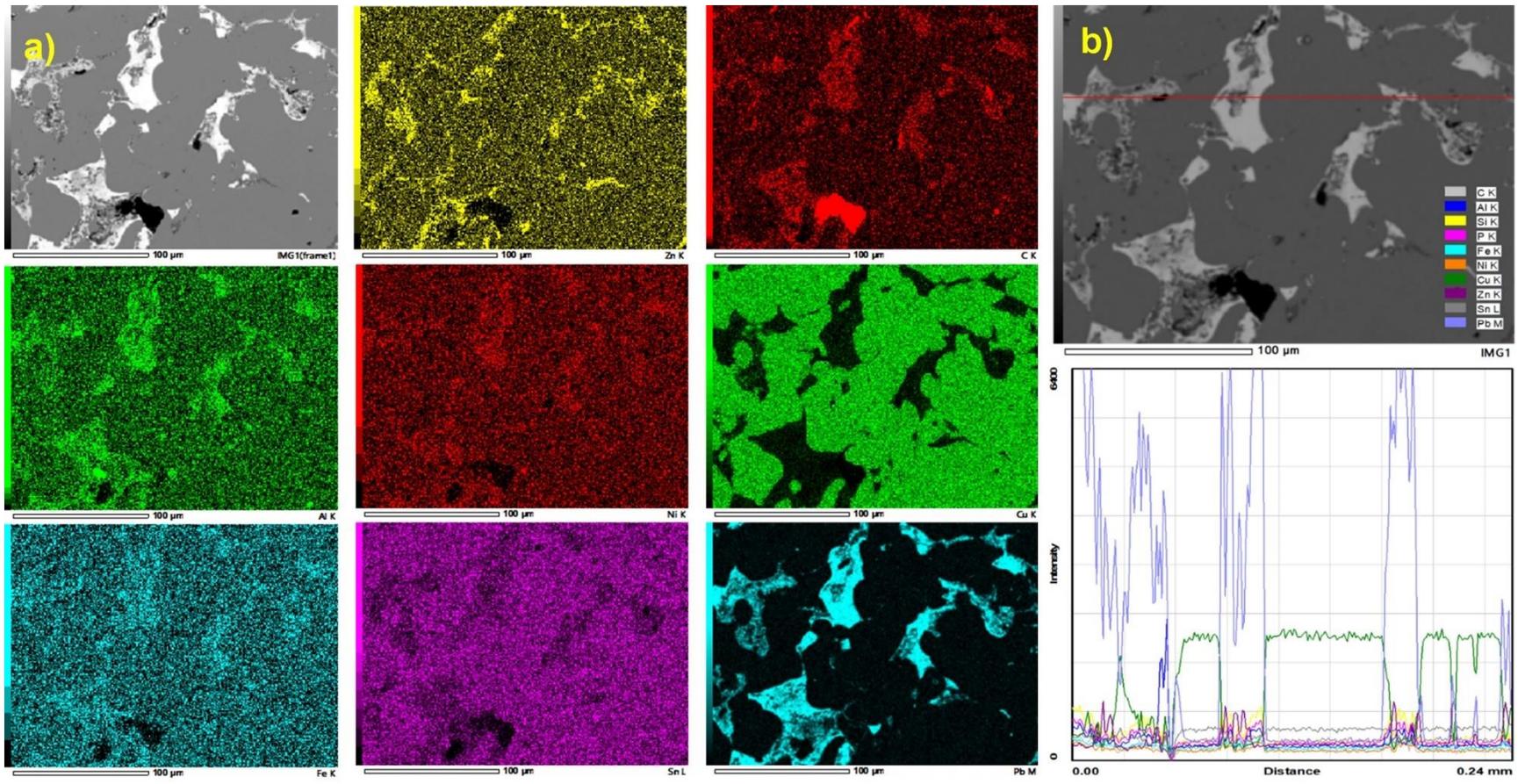


Figura 28. Resultados análisis EDS C3 a) Mapeo b) Lineal

5.1.3 Ensayo de desgaste

El ensayo de desgaste es una prueba utilizada para evaluar la resistencia al desgaste de un material.

Los siguientes resultados conciernen al cojinete muestra y las diferentes probetas de condiciones de trabajo. En la figura 29 se encuentra una gráfica distancia vs velocidad de desgaste, para poder entender esta grafica es necesario explicar previamente los puntos de interés.

Zona de acomodamiento: esta es la zona inicial en una curva de desgaste, en esta las superficies de contacto del material y la máquina del ensayo se adaptan y acomodan entre si (para este caso el rodillo, figura 13a). Durante esta etapa, se produce un desgaste inicial que suele ser más pronunciado y rápido, por lo que se tienen las velocidades de desgaste más elevadas del ensayo.

Zona de estabilidad: esta región viene posterior a la zona de asentamiento, en esta etapa el material adquiere una tasa de desgaste constante, dando como resultado las velocidades de desgaste más bajas. En general esta es la velocidad final de desgaste y entre menor sea el valor mayor es la resistencia al desgaste del material.

Zona de aceleramiento: este fenómeno se presenta cuando existe una discontinuidad o falla en el material, provocando, durante la etapa de estabilidad, el incremento en la velocidad de desgaste. La velocidad puede llegar a estabilizarse y entrar nuevamente a la zona de estabilidad.

Otro dato importante es que el cojinete muestra se desgastó de forma muy rápida por lo cual el ensayo solo abarcó 60[*min*], por lo que para realizar la comparación solo se tomaron 60[*min*] de ensayo de las probetas de condiciones de trabajo, las gráficas individuales se encuentran en el anexo 6.

Partiendo de lo anterior, es probable que la alta velocidad de desgaste del cojinete se deba a que no se utilizó ningún tipo de lubricante durante el ensayo, se debe recordar que en la industria estos componentes deben ir acompañados de un lubricante para funcionar de manera correcta y prevenir la falla. Con relación a su comportamiento en la gráfica de desgaste se puede observar que su zona de asentamiento abarca los primeros 400[*m*], posterior a esta distancia parece entrar a la zona de estabilidad con una velocidad de desgaste cercana a los $1 \cdot 10^{-3}$ [*mm*³/*Nm*].

Por otro lado, las 3 condiciones de trabajo examinadas tienen un comportamiento similar, teniendo su periodo de acomodamiento hasta alrededor de los primeros 300[*m*] y llegando a su zona de estabilidad aproximadamente a los 550[*m*]. De entre las tres, las condiciones de trabajo 3 son las que presentan una menor velocidad de desgaste con un valor de $1.25 \cdot 10^{-4}$ [*mm*³/*Nm*], seguidas de las condiciones de trabajo 2 con una velocidad de $2.89 \cdot 10^{-4}$ [*mm*³/*Nm*] y por ultimo las condiciones de trabajo 1 con un valor de $5.14 \cdot 10^{-4}$ [*mm*³/*Nm*].

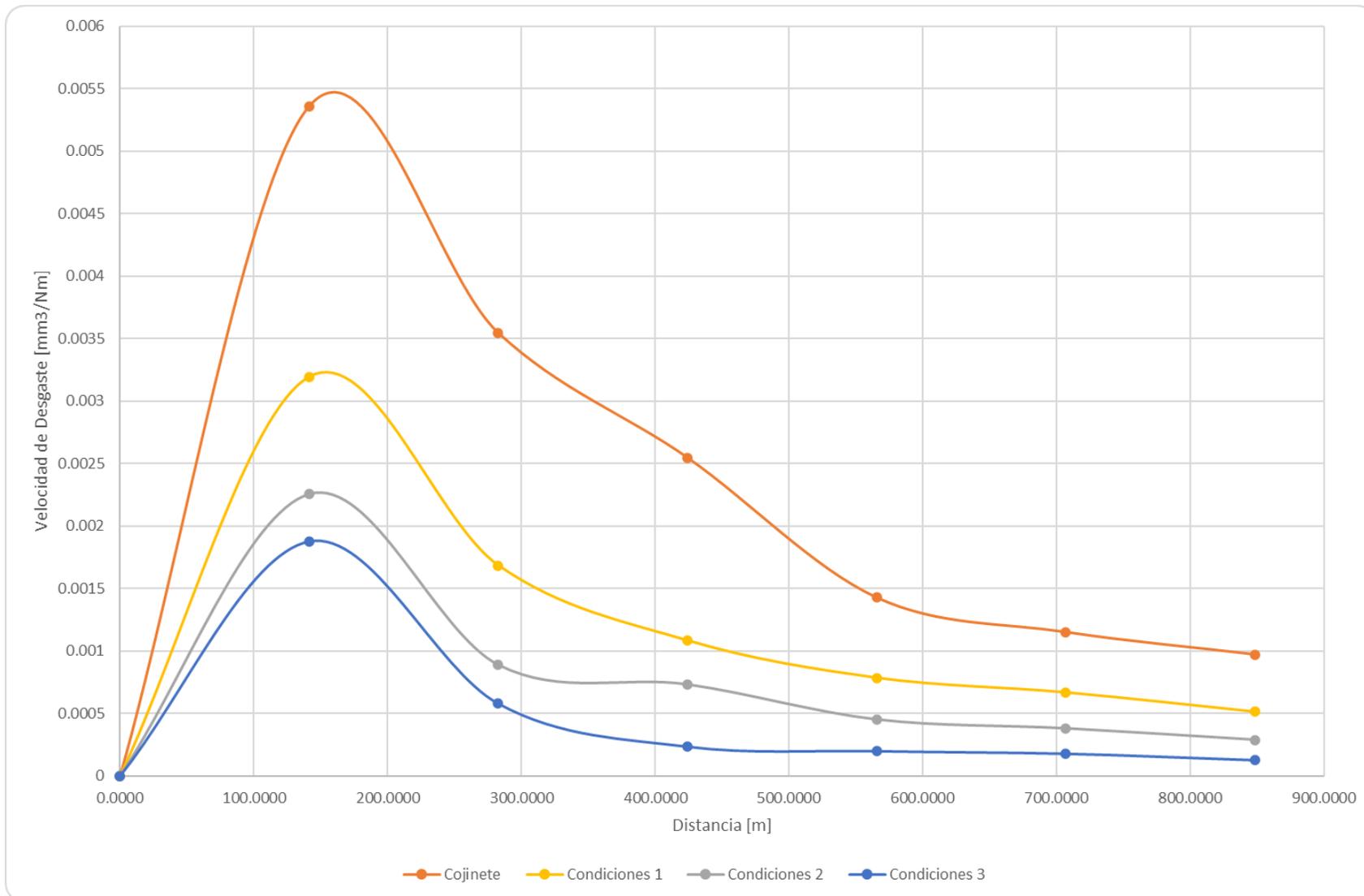


Figura 29. Ensayo de Desgaste para determinación de parámetros.

5.1.4 Recubrimiento

Como se menciona en el apartado 4 durante la fabricación de las probetas de material base y condiciones de trabajo se generó una capa de óxido alrededor de las piezas.

Al aplicar el recubrimiento de CuSO_4 previo al sinterizado, se obtuvo como resultado la disminución del espesor de la capa de óxido. En los siguientes resultados se distingue cual fue el efecto para en cada uno de los 3 materiales base.

En la figura 30 se muestra cómo es que afectó el recubierto de CuSO_4 a las diferentes aleaciones, dando como resultado que tanto la probeta de SAE 64 como las del material estándar continúan presentando una capa de óxido. De manera contraria y con resultados óptimos la aleación SAE 62 disminuyó casi por completo el espesor de la capa oxidada.

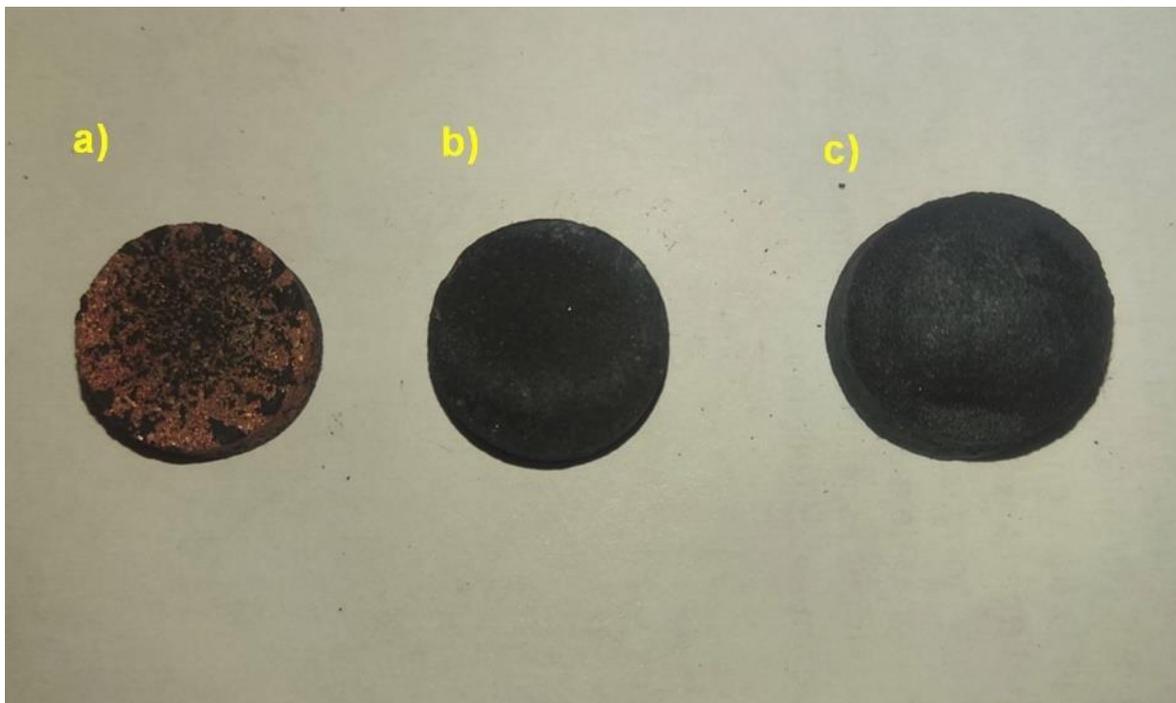


Figura 30. Probetas con recubrimiento a) SAE 62 b) SAE 64 c) Estándar

De manera adicional y para entender y comparar mejor el efecto del CuSO_4 en el bronce SAE 62, en la imagen 31, se tienen dos probetas, donde se visualiza una probeta sin el recubrimiento (figura 31a) y una probeta a la que se le aplicó el recubrimiento (figura 31b).

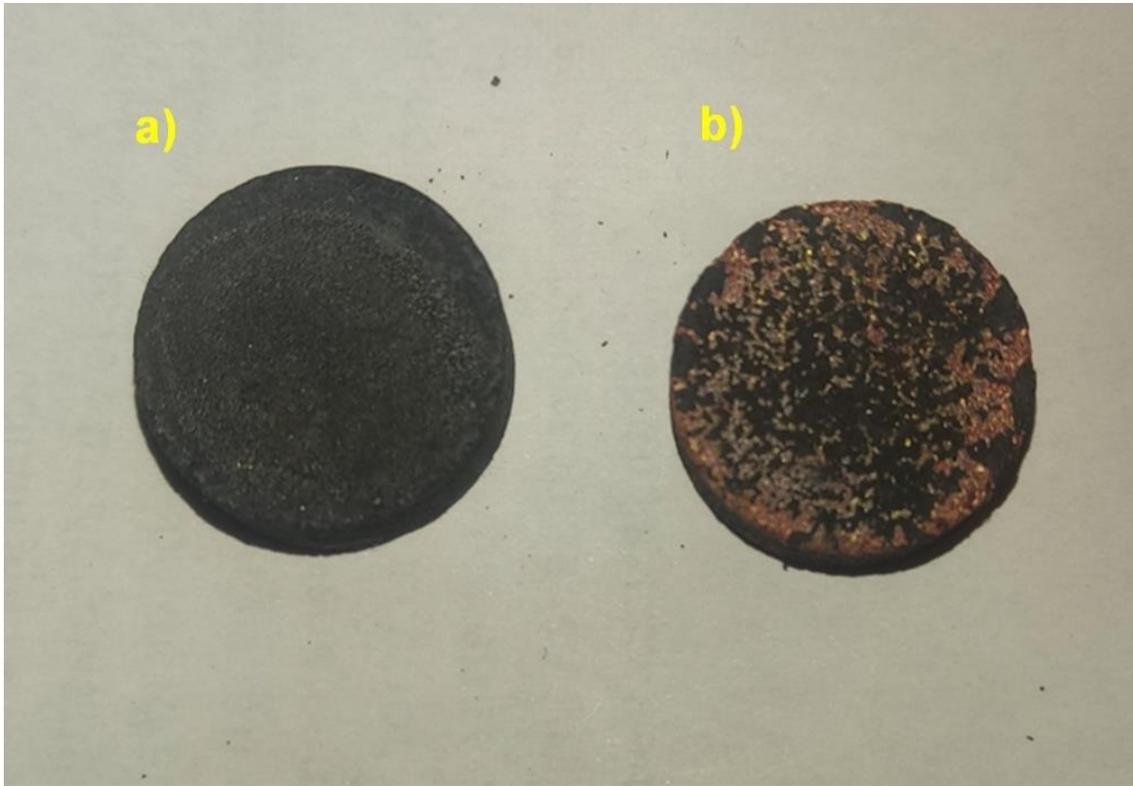


Figura 31. Probeta SAE 62 a) Sin recubrimiento b) Con Recubrimiento

5.1.5 Selección de parámetros

Durante el análisis de las probetas para la selección de parámetros se observaron tres fenómenos: líneas de mala unión, segregación localizada y oxidación de las piezas. De estos tres fenómenos se tomó solo el primero para determinar su influencia, a partir de esto y de los resultados previamente analizados se seleccionaron las mejores condiciones de trabajo. Los otros dos fenómenos solo se analizaron, debido a que se presentaron de manera similar en las 3 condiciones de trabajo y no se hay manera de distinguir alguna diferencia.

Como se observa en la figura 23, las líneas de baja unión se presentan en las tres condiciones de trabajo, tiendo una mayor presencia en las condiciones de trabajo 1 y 2, si comparamos las tres condiciones (tabla 6 del apartado 4.6) se distingue que el mayor cambio entre estas es el tiempo de sinterizado. Como se mencionó previamente el tiempo de sinterizado es un parámetro crítico en el proceso de sinterizado tanto un bajo como un alto valor de tiempo pueden tener efectos negativos, tomando esa información se deduce que los valores de tiempo utilizados para las condiciones de trabajo 1 y 2 tuvieron un tiempo de sinterizado elevado lo que trajo como consecuencia la distorsión de las piezas produciendo una

deformación que causo agrietamiento en el material figurándose en estas regiones oscuras lineales.

Por otro lado, es probable que el tiempo de sinterizado esté relacionado al exceso de oxidación de la probeta de las condiciones 4. Para poder explicar lo anterior es necesario entender que las probetas de bronce al estar expuestas a una atmosfera rica en oxígeno sufren una reacción, dicha interacción produce un efecto similar al de la descarburización de los aceros. A partir de lo anterior se cree que la capa de óxido formada en la superficie de las probetas se debe a que estas reaccionan bajo el modelo del núcleo reaccionante, es importante remarcar que este modelo está en función del tiempo y la temperatura. Con base en lo anterior, durante el sinterizado de las condiciones de trabajo 4 el tiempo de permanencia fue excesivo lo que permitió que aun teniendo la temperatura de sinterizado más baja, se generara una oxidación de casi el 100%. En este punto se debe destacar que el óxido en las otras probetas puede generar la formación de porosidades y por lo tanto el afectar la continuidad y disminuir sus propiedades mecánicas y tribológicas.

Es probable que la carga aplicada y la temperatura de sinterizado hayan tenido una influencia en la formación de poros en el material, pero debido a que las piezas presentan más defectos de mala unión que de porosidad no es posible determinar el efecto puntual de estos parámetros para cada condición testeada. Lo que sí permiten analizar, al menos la temperatura de sinterizado es la segregación localizada de los elementos Pb y Zn.

Para poder explicar este efecto en la figura 48 se tiene el diagrama de fases Cu-Pb (Anexo 3), en el que se distingue la insolubilidad de estos dos elementos (a diferencia de Sn y Zn donde sí existe solubilidad Figura 47 y 49), esto sumado al bajo punto de fusión del Pb ($327.5\text{ [}^{\circ}\text{C]}$) deriva que durante el proceso de sinterizado se promueva la difusión del Pb a la zona de última solidificación o lo que se traduce en este material como la zona interparticular. Un efecto similar sucedió con el Zn, que aun cuando sí entra en solución con el cobre, la alta temperatura de sinterizado le permitió difundirse a la zona interparticular. Se debe destacar señalar que la segregación del Zn fue parcial, ya que como se observa en los análisis por EDS, existe una concentración a lo largo de la matriz, pero que se acentuó en la región interpartícula, a diferencia del Pb, donde la segregación fue prácticamente total a estas zonas.

Contemplando todos los puntos se concluyó que las mejores condiciones de trabajo son las número 3, pues presentan una mejor continuidad reflejada en que con estas condiciones se encontraron los valores más bajos de velocidad de desgaste.

5.1.6 Elección del material base

Para poder seleccionar el mejor material para usarse matriz se contemplaron múltiples criterios.

El primero, las aplicaciones usos a nivel industrial de la aleación. Tomando como base la investigación previa tanto la aleación SAE 62 como la SAE 64 son utilizadas para fabricación de cojinetes y otros componentes sometidos a desgaste continuo. Por otra parte, la aleación estándar es un bronce de uso general, lo cual lo vuelve una opción “segura” para la fabricación de algún componente de bronce.

El segundo criterio para la evaluación de las aleaciones fueron sus propiedades mecánicas. Estas propiedades se encuentran registradas en la tabla 2. De esta tabla se observa que la aleación SAE 62 es la que valores más altos de módulo de elasticidad y resistencia máxima, además de dureza Brinell, seguida por la aleación SAE 64 y con los valores más bajos se encuentra la estándar. Mientras que comparte el valor de resistencia a la fatiga con la aleación SAE 64.

Como tercer criterio y con mayor peso se evalúa el espesor de la capa de óxido formada en las probetas blanco de cada una de las aleaciones bases después del proceso de sinterizado.

Como se menciona en el apartado 4.6, se sumergieron las probetas en una solución de CuSO_4 , esta propuesta surgió debido a que en los procesos industriales, para evitar la descarbonización de los aceros al realizarles tratamientos térmicos, se les aplica una capa de esta solución formando una capa de óxido de cobre CuO lo que frena la interacción del carbono con la atmósfera, por lo cual se esperó que, de manera similar, se produjera una capa protectora en las probetas frenando la oxidación del material.

Los resultados obtenidos de la aplicación del recubrimiento se muestran en la figura 30, en donde se ve que tanto la probeta de bronce estándar como la de SAE 64 presentan una notoria capa de óxido, contrario a la probeta de SAE 62 la cual presenta una capa muy pequeña casi nula. De manera adicional la figura 31 sirve para comparar el efecto del recubrimiento de la aleación SAE 62, haciéndose notorio que el recubrimiento de CuSO_4 minimizó la formación de óxido en la probeta, más adelante se realiza un análisis más extenso de este fenómeno.

En la literatura se indica que generalmente la capa de óxido en este tipo de probetas es producida por el Sn y el oxígeno de la atmósfera, pero al analizar las composiciones químicas (tabla 1) se aprecia que la aleación SAE 62 y SAE 64 tienen niveles similares de Sn y además superiores a los de la aleación estándar,

por lo que se deduce que este fenómeno es causado por la cantidad de Pb presente ya que es el único elemento cuyos valores son superiores para los materiales que siguieron presentado la formación de la capa de óxido. Para poder explicar esto se intuye que el fenómeno sucede debido a que el Pb reacciona con el CuSO_4 formando PbSO_4 lo que reduce la formación de la capa CuO evitando su efecto protector permitiendo la formación de SnO_2 . Se debe mencionar que en la industria para evitar la formación de esta capa de óxido se hace uso de una atmósfera controlada, la decisión de no optar por este método proviene de evitar la modificación de los equipos con los que se cuentan.

Al reunir todos los datos analizados se llegó a la conclusión que el mejor material para la matriz es el bronce SAE 62, esto debido a que es un material que ya es usado para la elaboración de cojinetes, tiene propiedades superiores a las de las otras dos aleaciones y sobre todo la capa de óxido formada al aplicarle el recubrimiento de CuSO_4 es prácticamente nula.

5.2 Evaluación del compuesto

Una vez determinados los parámetros de operación óptimos y elegir el material matriz, se pasó con la formación del material compuesto. Con la intención de encontrar los mejores niveles de refuerzo, se fabricaron probetas con tres porcentajes diferentes de partículas de refuerzo iniciando con las partículas de grafito (1%, 2% y 3%). Posteriormente de haber encontrado y fijando el nivel óptimo de grafito, se probaron los niveles de reforzamiento de carburo de silicio (1%, 3% y 5%). La evaluación de los diferentes niveles de refuerzo consistió en un ensayo de desgaste y se seleccionó el nivel con el mejor comportamiento y una velocidad de desgaste más baja.

A modo de caracterización de las diferentes probetas de material compuesto se obtuvieron micrografías y análisis químicos por EDS. Estos datos se presentarán antes de la evaluación de los niveles de refuerzo.

5.2.1 Micrografías

Antes de iniciar con el análisis del material compuesto se comparan las microestructuras de las condiciones de trabajo 3 y la probeta "blanco" (sin refuerzo) la cual ya cuenta con estas condiciones y además el recubrimiento de CuSO_4 .

En la figura 32a se tiene la micrografía correspondiente a las condiciones de trabajo uno, mientras que en la figura 32b corresponde a la probeta blanco. Al comparar ambas imágenes es evidente que la cantidad de porosidades disminuye, presentando una mejor continuidad, con esto se evidencia el efecto positivo del recubrimiento de CuSO_4 en la formación de las probetas de SAE 62.

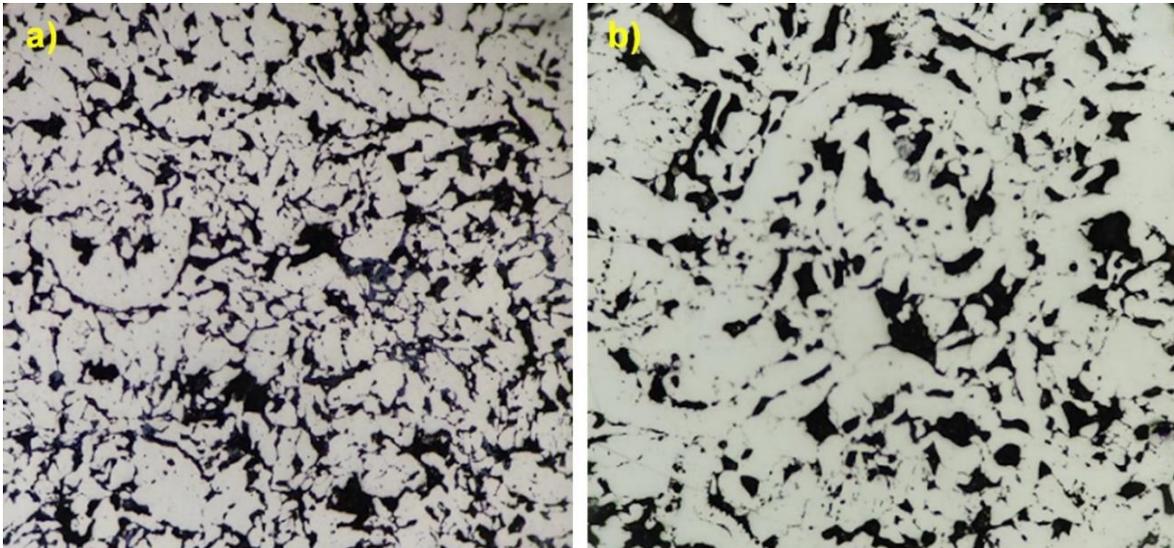


Figura 32. Microrgrafías 100x a) Condicones de trabajo 1 b) Probeta Blanco

Realizado el anterior análisis se puede pasar a las siguientes imágenes que corresponden a las microestructuras de las diferentes probetas producidas del material compuesto.

Es importante mencionar que para este punto ya no se evaluó la continuidad de las probetas, por lo cual, solo se analizaron los resultados correspondientes a las probetas con los mejores niveles de reforzamiento (las micrografías de todas las probetas se encuentran en el anexo 5).

En la figura 33 se muestran las micrografías con ataque químico, permitiendo comparar la microestructura del cojinete muestra y las probetas blanco y con reforzo. En la figura 33a, que corresponde al cojinete muestra, se observa una estructura con granos equiaxiales con formas poligonales y de manera no muy clara se observan lo que pueden ser maclas. Por otra parte, la probeta blanco (figura 33b) también presenta el mismo tipo de grano, pero de un tamaño mayor, además también son visibles maclas en el material, estas se distinguen como líneas paralelas dentro del grano y destacan por tener una tonalidad diferente a la del grano. Para ambas probetas de composito (figura 33c y 33d) se muestran los mismos resultados, granos equiaxiales, de tamaños parecidos y con la presencia de maclas.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente se identifica que los 4 materiales tienen una estructura de granos equiaxiales, producidos por el proceso de sinterizado, en el que el material sufre una recristalización, transformando la estructura dendrítica y permitiendo la formación de los granos equiaxiales, la única diferencia notoria entre el cojinete y las probetas fabricadas, es el tamaño del grano,

esta diferencia se puede deber a múltiples factores, como las condiciones de trabajo del cojinete o la ampliación de algún tratamiento térmico posterior. Por otro lado la presencia de maclas es otro fenómeno observado en los 4 materiales, estas maclas son producidas por la deformación y contracción que sufren las partículas del material durante la pulvimetalurgia, de manera puntual durante los procesos de compactación, donde las altas cargas a las que se somete el material producen el deslizamiento de los planos, de manera similar durante el sinterizado las partículas comienzan a unirse lo que produce su contracción y por lo tanto su deformación, generan el cambio de orientación en los cristales de material propiciado la formación de las maclas. Como dato extra, el diagrama de fases Cu-Sn figura 47 indica que para todos estos materiales se presentan las fases alfa y épsilon.

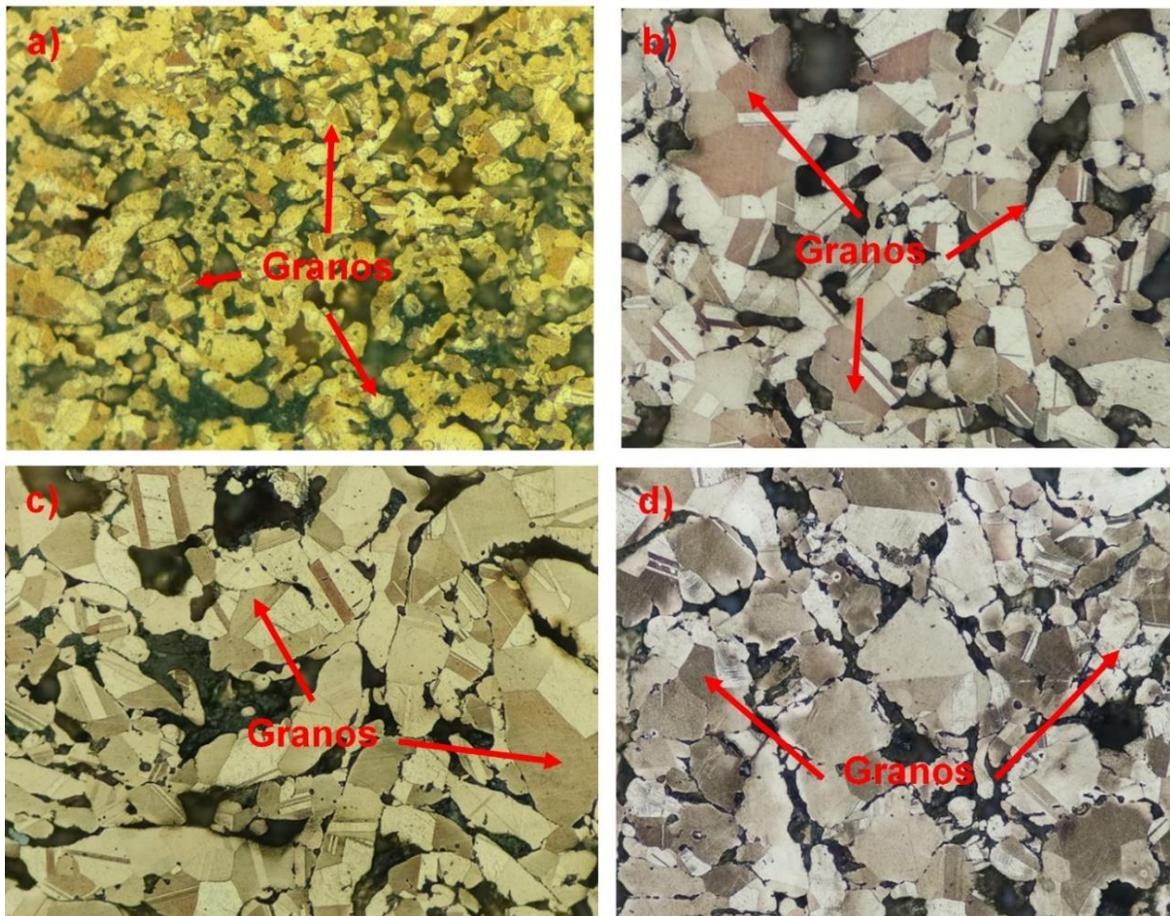


Figura 33 . Microestructura atacada 20x a) Cojinete b) Probeta Blanco c) Probeta con grafito d) Probeta con grafito y carburo de silicio

La figura 34, presenta las micrográficas obtenidas para el cojinete muestra y las probetas blanco y de material compuesto. Estas imágenes permiten comparar los detalles de la continuidad de los diferentes materiales. Debido a que las imágenes

fueron tomadas con SED (Electrones retro dispersados) el ataque químico no es tan apreciable, pero al igual que para las probetas de condiciones de trabajo, este tipo de configuración permite el analizar la segregación localizada en el material.

Como punto de comparación, en la figura 34a se encuentra la micrografía del cojinete muestra, retomando el análisis previo, se pueden observar las porosidades del material de color negro y la matriz del material con un color gris. Por su parte la imagen 33b muestra la probeta blanco, en donde se distingue la matriz con un color gris claro, mientras que la región inter particular destaca con un color oscuro, esto mismo se puede ver en las figuras 34c y 34d, correspondientes al material compuesto. La principal diferencia en estas últimas 3 es la morfología y el tamaño de las porosidades, siendo la probeta con grafito (figura 34c) la que presenta una menor tamaño y cantidad de poros, mientras que la probeta blanco presenta porosidades de mayor tamaño, la que contiene carburo de silicio y grafito (figura 34d) presenta mayor cantidad de poros, pero de un tamaño más pequeño.

Este efecto puede ser producido debido al tamaño de las partículas en el material; cómo se encontró en la literatura, la unión de la partícula se ve afectada por el efecto del “cuello de botella” en el que la distancia entre partículas juega un papel fundamental. En el caso de la probeta blanco al tener solo polvo de bronce se asume que el tamaño de sus partículas es similar además del tamaño de partícula superior, por lo cual las distancias entre las partículas también van a ser similares lo que va a generar huecos de tamaños similares y de tamaños superiores, por otro lado las partículas de grafito tienen un tamaño menor lo que permite introducirse en los pequeños espacios entre las partículas de bronce y por lo tanto generar una mejor unión y la reducción del tamaño de los poros, al igual que para el material con partículas de grafito y carburo de silicio, donde los diferentes tamaño de partículas permiten una mayor unión.

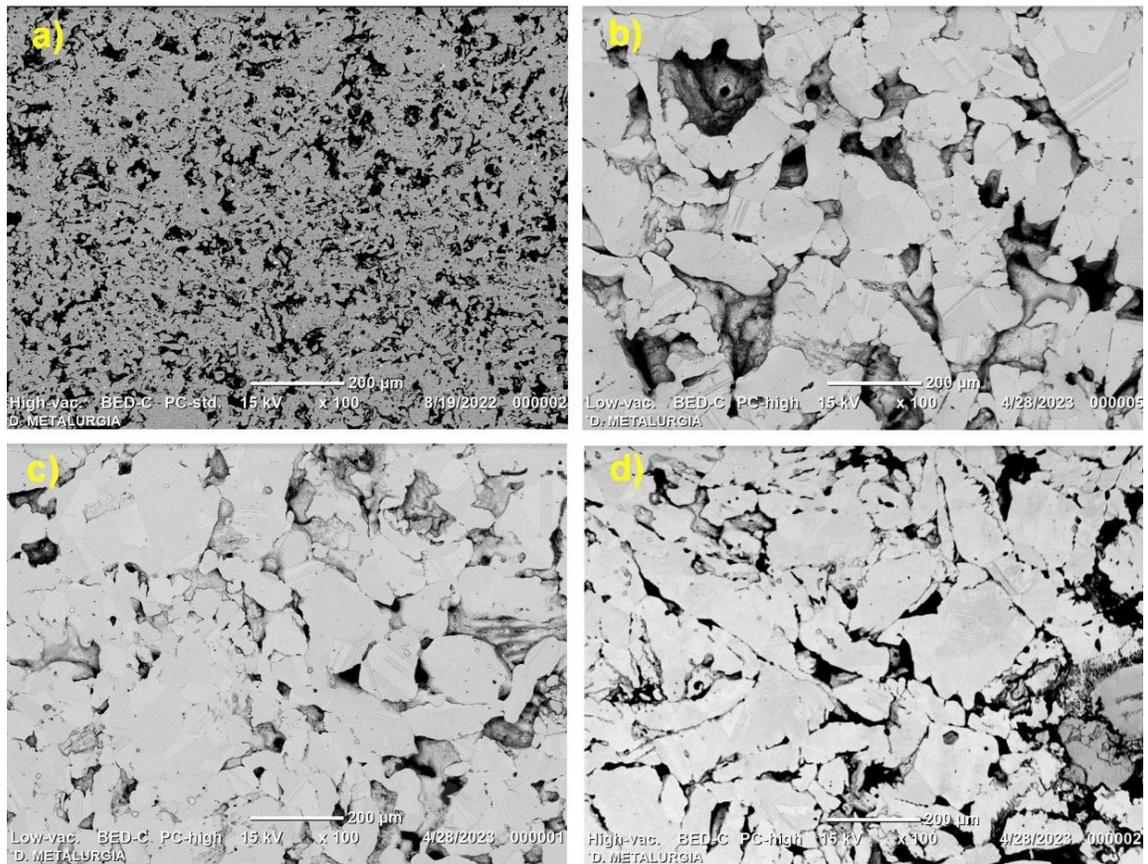


Figura 34. Micrografías atacadas MEB 100x

Algo que es importante mencionar es que al menos de manera previa no se observa segregación localizada, esto se deduce con base a que la zona inter partícula está conformada por tonos oscuros (de grises a negros) a diferencia de lo observado en las probetas de las condiciones de trabajo en donde esta región resaltaba en color blanco.

De modo de visualizar mejor la presencia de los refuerzos en el compuesto, se obtuvo una imagen con campo oscuro, este tipo de filtro es muy útil para observar las fases dispersas o agrietamientos en el material, lo cual lo vuelve una buena opción para poder señalar los refuerzos de una manera más clara.

Como se mencionó previamente en la figura 35 están señalados los refuerzos en el material, el más fácil de distinguir es el grafito con un color amarillo y que resalta en la zona inter particular del material, contrario al carburo de silicio que es más difícil de notar, pero también se encuentra señalado y destaca en con un color azul brillante, este refuerzo también se encuentra depositado en la zona inter particular y entre más cerca esta de la superficie más resalta su colocación.

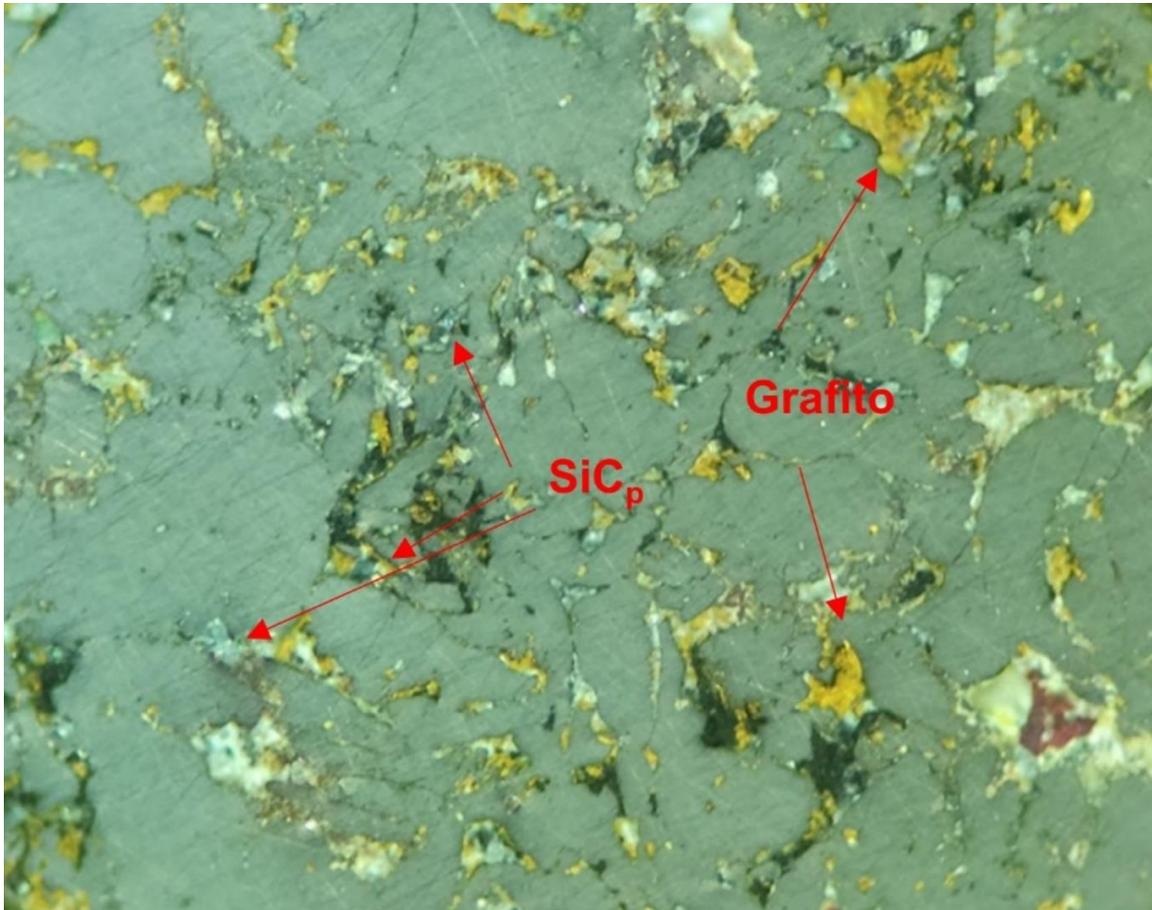


Figura 35. Micrografía Composito SiCp-Gp a 100x en campo oscuro.

5.2.2 Espectrometría de Rayos X Característicos (EDS)

Los siguientes resultados corresponden al análisis químico realizado para las probetas blanco y las fabricadas con refuerzo, con estos resultados se comparó la homogeneidad de la matriz y se corrobora que no existe segregación.

Para la probeta blanco, el análisis químico por mapeo se encuentra en la figura 36a, y como se esperaba la segregación es uniforme en todo el material, esto se corrobora en la figura 36b, donde al pasar la línea en la zona oscura se muestra la presencia mínima de elementos.

La figura 37a atañe al análisis por mapeo de la probeta con grafito. Se visualiza un comportamiento similar al de la probeta blanco, con una distribución homogénea de sus elementos aleantes con algunas regiones pequeñas de segregación como se observa en el apartado del plomo, además de una intensidad en la presencia de

carbono. En análisis lineal, figura 37b vuelve a confirmar que la zona oscura corresponde a porosidades, mientras que la región gris es el compuesto.

El análisis por mapeo de la probeta con grafito y carburo de silicio se observan en la figura 38a, este material también presenta una homogeneidad en su composición, además se distinguen los refuerzos, el carburo de silicio resalta en con un color amarillo intenso y como se mencionaba, se encuentra atrapado en las porosidades del material, por otro lado, el grafito presenta aglomeramiento que se muestra con zonas rojas intensas, este sucede debido al tamaño pequeño de las partículas de grafito. El análisis lineal (figura 38b) confirma que el grafito se aglomeró, pues cuando la línea atraviesa la zona donde se indicaba que había alta concentración de carbono, se dispara el pico de este elemento.

Como se mencionó anteriormente, estos análisis confirmaron que las probetas posteriores al uso de las condiciones de trabajo 3 y la aleación SAE 62 como matriz, no solo tuvieron una mejoría en su matriz, también se redujo prácticamente por completo la segregación, esto sucedió gracias al recubrimiento que como se observaba en la figura 31 cumplió su objetivo, frenando al menos para la aleación SAE 62 la reacción del oxígeno de la atmósfera con la probeta, lo que generó que las partículas se unieran mejor y por lo tanto reducir la porosidad del material, esto pudo tener relación con la segregación, ya que, al haber menos zonas a donde migrar, el Pb y el Zn se segregaron de manera uniforme a lo largo del material.

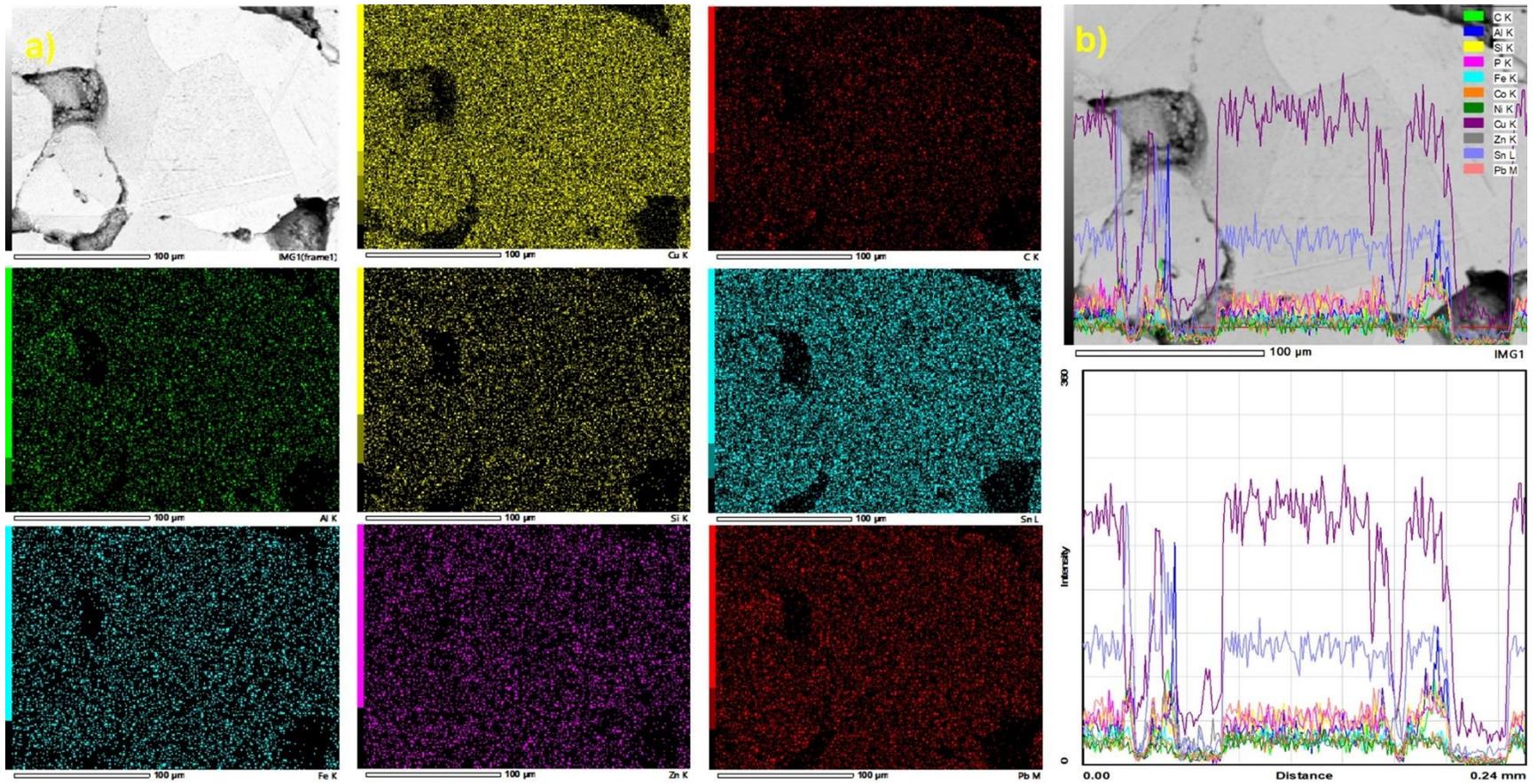


Figura 36. Resultados de Análisis de EDS Probeta Blanco a) Mapeo b) Lineal

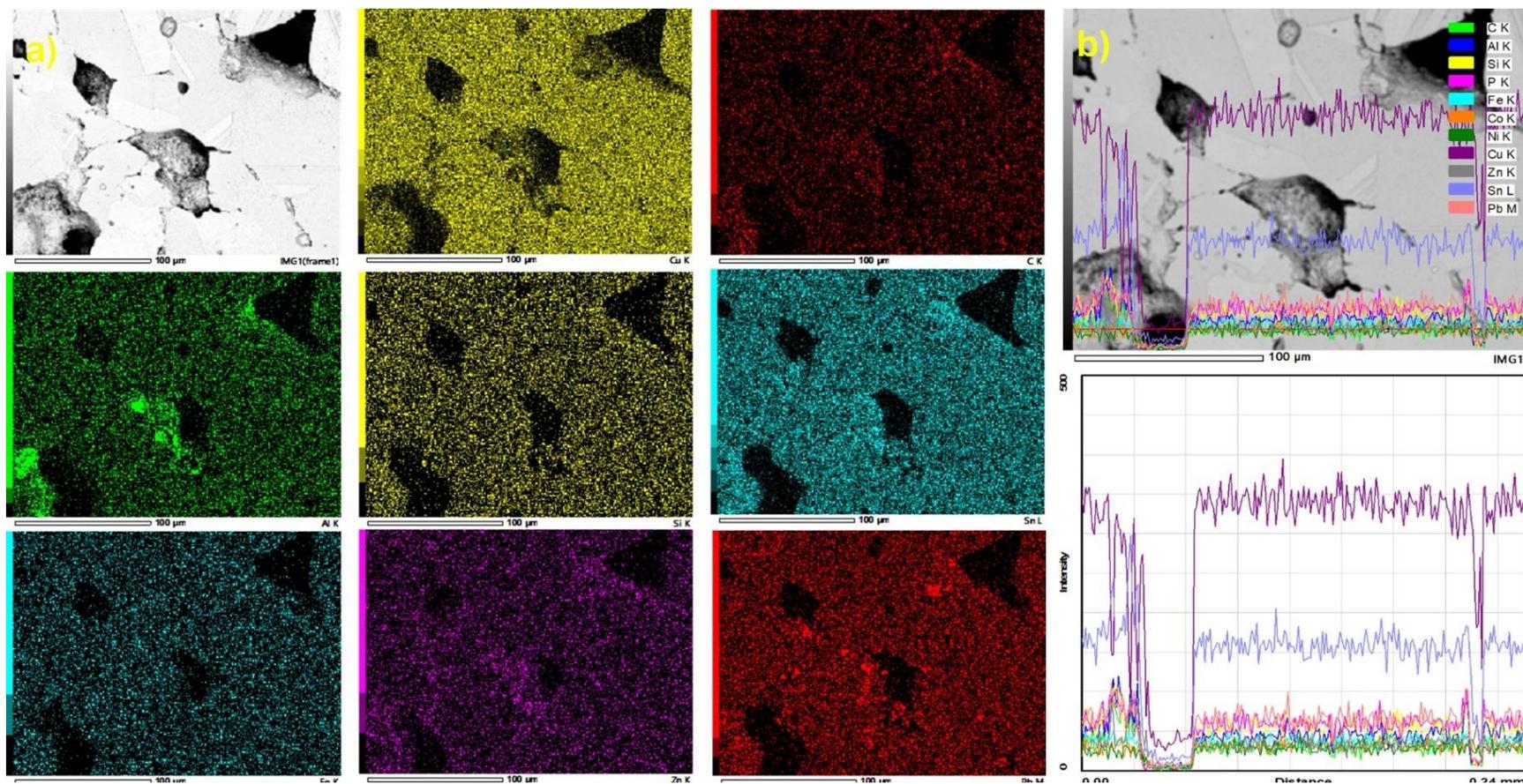


Figura 37. Resultados EDS Probeta Grafito a) Mapeo b) Lineal

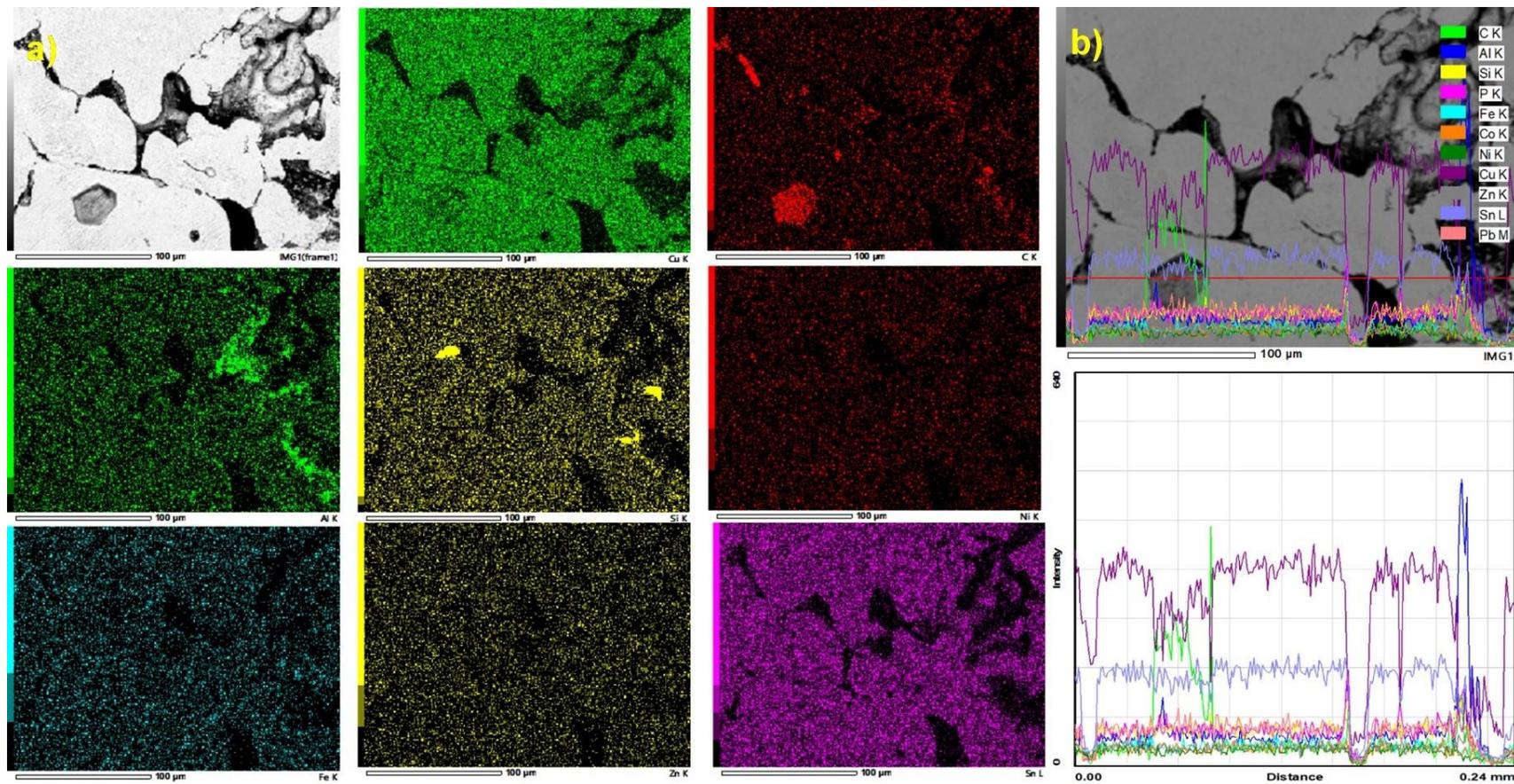


Figura 38. Resultados EDS Probeta Grafito y SiC a) Mapeo b) Lineal

5.2.3 Ensayo de desgaste

Para poder evaluar los mejores niveles de refuerzo las diferentes probetas de composito se sometieron a ensayos de desgaste. Para estos materiales el tiempo de ensayo fue de 4[h] que fue el tiempo donde se llegó a una zona de estabilidad. Las gráficas individuales se encuentran en el anexo 6.

Los primeros niveles en ser analizados fueron los de partículas de grafito, en la gráfica de la figura 39a se muestra el comportamiento de la probeta blanco y los diferentes niveles de grafito. En términos general los 4 materiales tienen un comportamiento similar teniendo su periodo de acomodamiento en los primeros 500[m] y a partir de ahí comienzan a entrar a la zona de estabilidad.

Para poder hacer un análisis más detallado la figura 39b presenta un aumento a la zona de estabilidad, es necesario aclarar que al hacer este aumento las pequeñas variaciones en la velocidad de desgaste se muestran como picos muy pronunciados. Con lo anterior aclarado es evidente que el material con una menor velocidad de desgaste es el composito con 2% de grafito con una velocidad de desgaste de $4.75 \cdot 10^{-6}$ [mm³/Nm] seguido de la probeta con 1% de grafito que alcanzó una velocidad de $1.08 \cdot 10^{-5}$ [mm³/Nm].

Antes de hablar de las velocidades de desgaste de las dos probetas restantes es necesario hacer un paréntesis para hablar de su comportamiento durante el ensayo ya que ambas probetas presentaron zona de aceleramiento indicando una posible discontinuidad en el material, en el caso del composito formado con 3% de partículas de grafito puede deberse a que se superó el nivel de refuerzo benéfico, pues aunque el agregar partículas como refuerzo aumenta las propiedades del material un exceso de estas partículas provoca el efecto contrario conduciendo a disminuir o provocar defectos en el composito. Esto se corrobora debido a que la velocidad de desgaste alcanzada por la probeta blanco fue de $1.34 \cdot 10^{-5}$ [mm³/Nm], mientras que para el composito fue de $1.69 \cdot 10^{-5}$ [mm³/Nm].

Con estos datos se concluye que el mejor nivel de refuerzo de partículas de grafito es el 2% teniendo la velocidad de desgaste más baja y sin presentar zonas de alto desgaste.

Una vez que se obtuvieron estos resultados se fabricaron las probetas reforzadas con SiC, estas contaron con las condiciones de trabajo 3, el material SAE 62 y el 2% de partículas de grafito en peso.

En la figura 40a se encuentra la gráfica donde se visualiza el comportamiento de los diferentes niveles de SiC y el composito con 2% grafito que se utilizó como punto de comparación. En esta grafica se puede observar que las probetas con 1% y 3% de partículas de carburo de silicio tiene un comportamiento similar a las probetas anteriores, teniendo su periodo de acomodamiento en los primeros 500[m] y posteriormente entrando a la zona de estabilización. Esto no sucedió para la probeta

con 5% de SiC, aunque sí presenta un intervalo de asentamiento y empieza a entrar a la zona de estabilidad, presenta muchas zonas de alta velocidad de desgaste, aún con este comportamiento la velocidad de desgaste es inferior a la del cojinete muestra con una velocidad aproximada de $1 \cdot 10^{-4}$ [mm³/Nm].

Con lo anterior aclarado, la figura 40b presenta el aumento a la zona de estabilidad en donde se observa que la probeta con 1% de SiC tiene una velocidad superior al del composito con 2% de grafito con un valor de $4.75 \cdot 10^{-6}$ [mm³/Nm], mientras que la probeta con 5% de partículas de SiC se encuentra por muy por arriba de los valores $4.75 \cdot 10^{-6}$ [mm³/Nm] y $2.10 \cdot 10^{-6}$ [mm³/Nm] lo que da como conclusión que esta probeta cuenta con el nivel óptimo de refuerzo de partículas de SiC.

De manera adicional y amén de tener un panorama más amplio de las probetas examinadas, en la gráfica de la figura 41 se presentan el ensayo de desgaste de todos los materiales correspondientes a la selección de niveles de reforzamiento en donde además se vuelve evidente que la probeta con 2% de grafito y 3% de SiC es la probeta con la menor velocidad de desgaste.

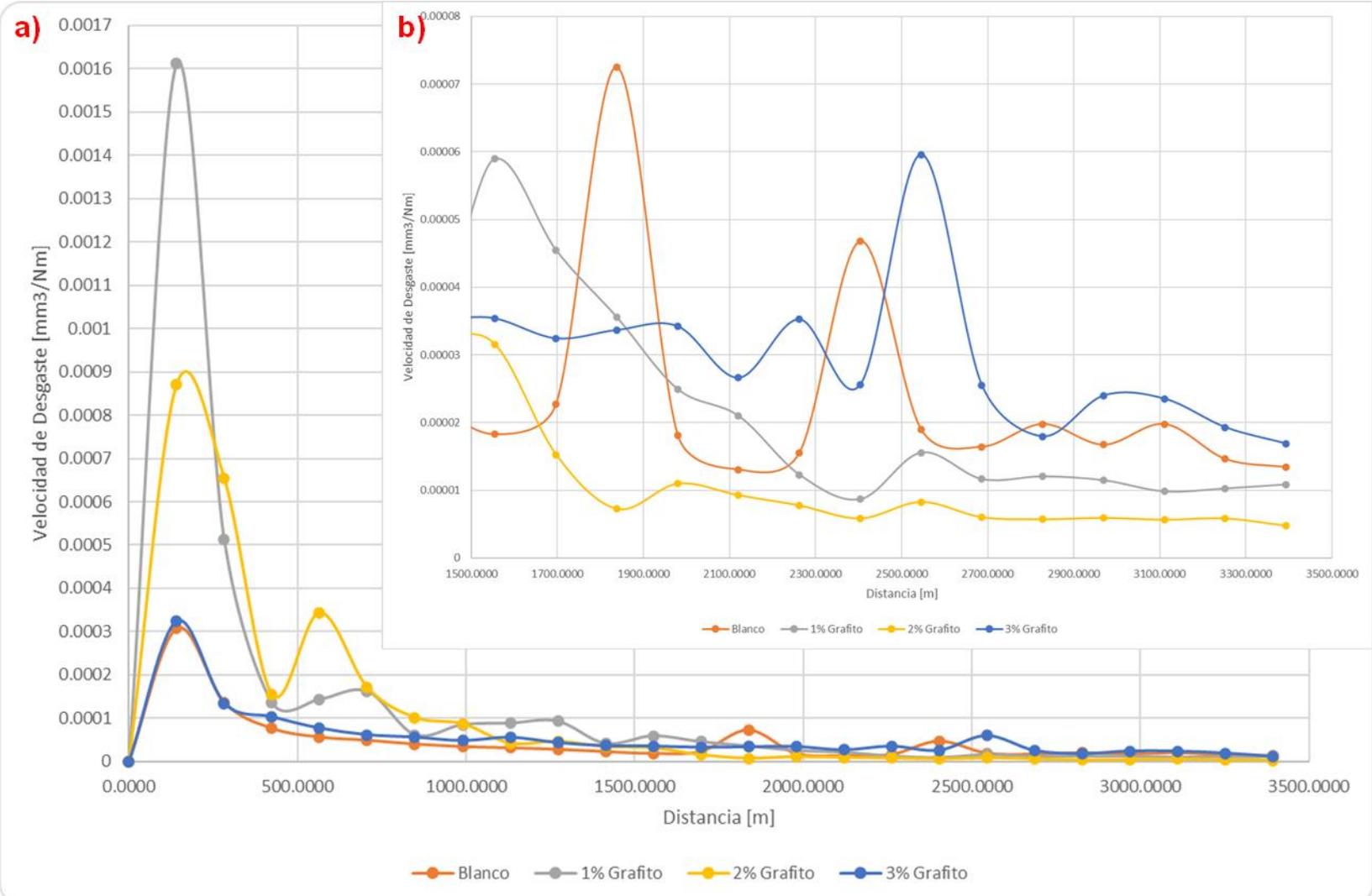


Figura 39. Ensayo de desgaste probetas con grafito a) Grafica completa b) Aumento a zona de asentamiento

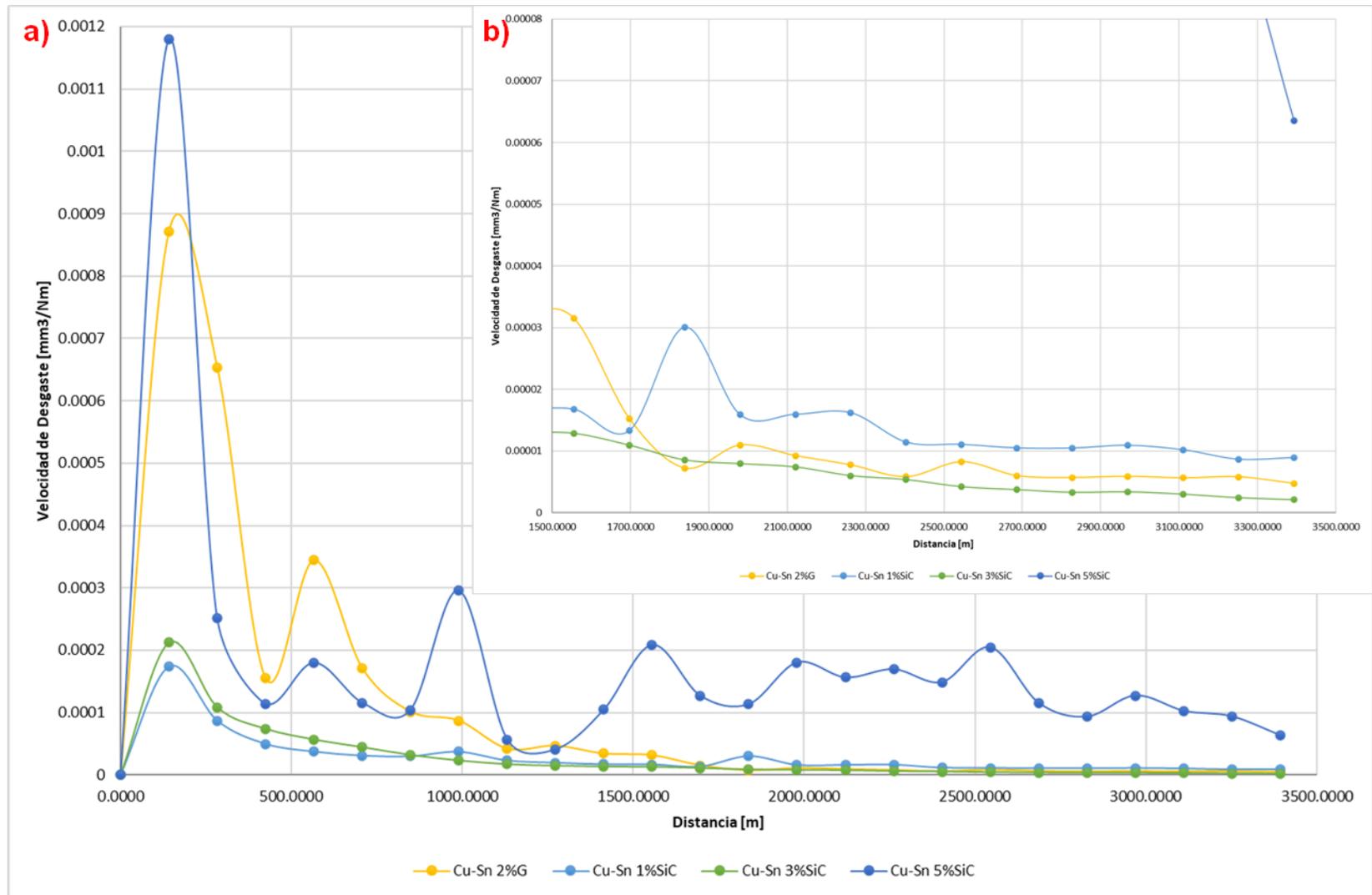


Figura 40. Ensayo de desgaste probetas con grafito y SiC a) Grafica completa b) Aumento a zona de asentamiento

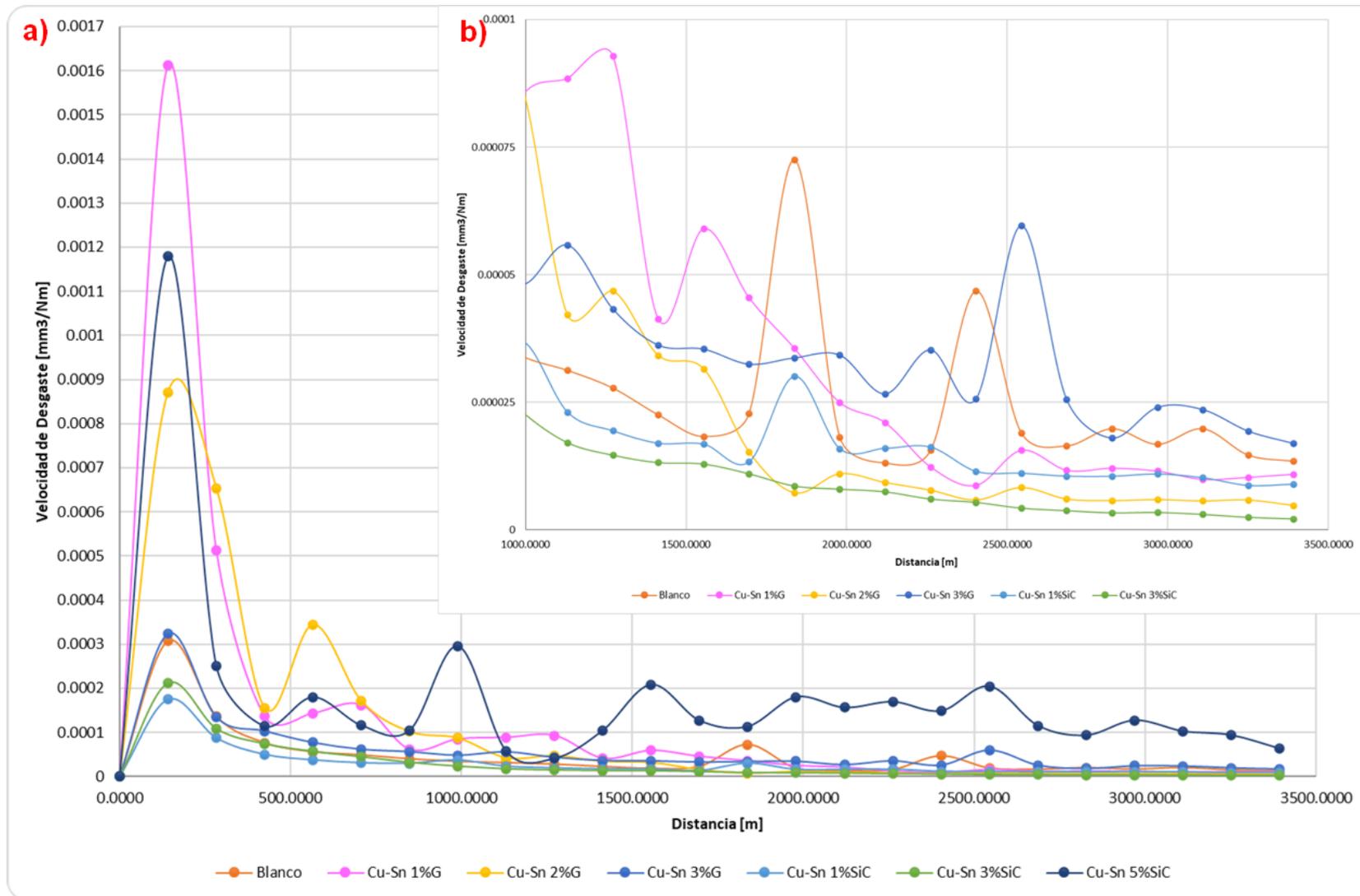


Figura 41. Ensayo de desgaste general a) Grafica completa b) Aumento a zona de asentamiento

6. Conclusiones

Las conclusiones a las que ha llegado en este trabajo son las siguientes:

El utilizar la ingeniería inversa como herramienta permitió la caracterización de un componente comercial y con la información obtenida se propusieron las bases para generar un material con una velocidad de desgaste inferior.

El uso de la técnica EDS, proporcionó información sobre la segregación química del Pb y del Zn.

El tiempo de permanencia es la variable que más afecta en la fabricación del composito ya que a mayor tiempo de permanencia se aumenta la formación de la capa de óxido en la parte exterior del material.

Las mejores condiciones de sinterizado son: 230 [kN] de compresión, 1[h] de tiempo de permanencia y una temperatura de 800 [°C].

El material óptimo para usarse como matriz del material compuesto fue la aleación de bronce SAE 62.

El uso de recubrimiento de CuSO_4 en las probetas fabricadas con la aleación SAE 62 mejoró la continuidad de la matriz y frenó la segregación del Pb y Zn.

Un exceso de refuerzo genera un efecto contrario reduciendo las propiedades del material en vez de aumentarlas.

Los mejores niveles de refuerzo fueron: 2% de partículas de grafito y 3% de partículas de carburo de silicio.

7. Referencias

1. What are plain bearings? (2019). Obtenido de GGB: <https://www.ggbearings.com/es/tribou/internet-bearings/cojinetes>
2. ¿Qué son los cojinetes lisos? | GGB. <https://www.ggbearings.com/es/por-que-elegir-ggb/preguntas-frecuentes/cojinetes/que-son-los-cojinetes-lisos>
3. Cojinete liso. (2020, October). Fabricación De SOGEARS. <https://es.sogears.com/rodamientos/145-cojinete-liso>
4. [Susilowati, S., Fudholi, A., & Sumardiyanto, D. (24 de February de 2022). Mechanical and microstructural characteristics of Cu–Sn–Zn/ Gr metal matrix composites processed by powder metallurgy for bearing materials. Results in Engineering, 1-7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100377>
5. ¿Por qué usar bujes de bronce? | GGB. (n.d.). <https://www.ggbearings.com/es/por-que-elegir-ggb/preguntas-frecuentes/cojinetes/por-que-usar-bujes-de-bronce>
6. Rathore, N., & Jain, P. K. (2014). Reverse Engineering Applications in Manufacturing Industries: an Overview. In DAAAM international scientific book. (pp. 567–576). <https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2014.45>

7. Plumb, J. (2023). Reverse engineering. Cambridge Design Technology. <https://www.cambridge-dt.com/the-role-of-reverse-engineering-in-modern-product-design/>
8. GDM news & GDM news 28 junio, 2021. (2021, June 28). HISTORIA DE LOS RODAMIENTOS Y SU EVOLUCIÓN. General Driver Motor. <https://www.generaldrivermotor.com/gdm/historia-de-los-rodamientos-y-su-evolucion/>
9. Bearing Timeline - American Bearings Manufacturers Association. (n.d.). https://web.archive.org/web/20141228170532/http://www.americanbearings.org/?page=bearing_timeline
10. Smith, G. T. (2016). Machine Tool Metrology. In Springer eBooks. Springer Cham. (pp 126-129) <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25109-7>
11. Jvnbe. (2023, May 30). jvnbe123. Manufacturer, Supplier & Wholesaler of Bearings - JVN Bearings FZE. <https://jvnbearings.com/author/jvnbe123/>
12. SKF. (2018). Rodamientos. Grupo SKF. https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d19680416953/pdf_preview_medium/0901d19680416953_pdf_preview_medium.pdf
13. Ventajas respecto a los rodamientos · Permaglide. (n.d.). <https://www.permaglide.com/es/cojinetes/ventajas-respecto-a-los-rodamientos/>
14. Aleaciones de alto rendimiento - Acerinox fabricante de acero inoxidable. (n.d.). <https://www.acerinox.com/es/soluciones/aleaciones-especiales/>
15. Cojinetes autolubricados sinterizados Proceso de fabricación. (n.d.). <https://selfoil.com/es/proceso-de-fabricacion>
16. ¿Cuál es el proceso de fabricación de los cojinetes giratorios? (2021, August 6). LDB. <https://www.ldb-bearing.com/teniendo-conocimiento/conocimiento-del-rodamiento-de-giro/cual-es-el-proceso-de-fabricacion-de-los-cojinetes-giratorios.html?lang=es>
17. Rapiddirect. (2022, August 9). Fundición Centrífuga: Diferentes Tipos de Procesos, Aplicaciones Industriales. Rapiddirect. <https://www.rapiddirect.com/es/blog/fundici%C3%B3n-centr%C3%ADfuga/>
18. Diferencias entre cojinetes y rodamientos | GGB. (n.d.). <https://www.ggbearings.com/es/por-que-elegir-ggb/preguntas-frecuentes/cojinetes/cuales-son-las-diferencias-entre-los-cojinetes-lisos-y-los-rodamientos>
19. Bouzón, R. (2016). Aplicación de cojinetes de fricción a M.C.I. <http://hdl.handle.net/2183/16642>
20. Besednjak, A. (2009). Materiales compuestos. Univ. Politèc. de Catalunya. (pp 15-16)
21. Hull, D. (2009). Materiales compuestos. Reverte. (pp 1-7)
22. Stupenengo, F. (2011). Materiales y materias primas: Materiales compuestos (Vol. 10). Colección Encuentro Ine.

23. ARAHAL. (n.d.). Materiales Compuestos. Ingemecánica. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>
24. Materiales compuestos o composites (I). (2014, April 22). Construinnova. <https://construinnova.net/2014/04/22/materiales-compuestos-o-composites-i/>
25. Universidad de Santiago de Chile. CAPÍTULO 22: PULVIMETALURGIA. https://www.metalurgia.usach.cl/sites/metalurgia/files/documentos/capitulo2_2.pdf
26. Xoo Studio. (2019, November 28). Pulvimetalurgia. TEMSA. <https://www.temsa.cat/pulvimetalurgia/>
27. Cabbalero, R. Procesos de Fabricación: Metalurgia de polvos. Facultad de Ingeniería Industrial. https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/541/13_metalurgia_de_polvos.pdf
28. Díaz Becerro, S. (2009). DIFERENTES ASPECTOS DE LA METALURGIA DE LOS POLVOS (Vol. 3). Federación de Enseñanza de CC. OO. de Andalucía. <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd5104.pdf>
29. Pérez, F. M. (2002). La tribología: Ciencia y Técnica Para el Mantenimiento. Editorial Limusa.
30. Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Butterworth-Heinemann.
31. ASTM International. (2017). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus (Standard No. G99). ASTM International.
32. Madhesh, D., Jagatheesan, K., & Sathish, T. (2021). Microstructural and mechanical properties of copper matrix composites. Materials Today: Proceedings, 1437–1441.
33. Manohar, G., Dey, A., & Pandey, K. (April de 2018). Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review. AIP Conference Proceedings, 1-8. doi:doi: 10.1063/1.5032003
34. Mohanavel, V., Vinoth, T., & Iyankumar, R. (2020). Mechanical and corrosion behaviour of copper matrix composites fabricated by powder metallurgy process. Materials Today: Proceedings, 3394–3398.
35. Rajkovic, V., Bozic, D., & Devecerski, A. (2012). Characteristic of copper matrix simultaneously reinforced with nano- and micro-sized Al₂O₃ particles. Materials Characterization, 129-137.
36. Satishkumar, P., Mahesh, G., Meenakshi, R., & Vijayan, S. (20 de June de 2021). Tribological characteristics of powder metallurgy processed Cu-WC/SiC metal matrix composites. Materials Today: Proceedings, 459-465. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.449
37. La Paloma Metales (n.d.) https://lapaloma.com.mx/lapaloma_metales/bronce.html
38. Leaded Semi-Red Brass (Valve Metal), UNS C84400, Copper Casting Alloy. (n.d.)

- <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a80cf3ff700e4364a32bcb4a1a684e12>
39. Tin Bronze, UNS C90500, Copper Casting Alloy. (n.d.). <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=558f2c0231c840339b8056ffb747b2c7>
 40. High-Leaded Tin Bronze, UNS C93700, Copper Casting Alloy (SAE 64). (n.d.) <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=374764f6b3604247b29eb837ca23945b&ckck=1>
 41. Ansys GRANTA EduPack software, ANSYS, Inc., Cambridge, UK, 2023 (www.ansys.com/materials)
 42. Metalografía de piezas de pulvimetalurgia, Struers.com. <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Materials/Powder-metallurgy>
 43. Cu-Sn | Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico. <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/diagrama-cu-sn>
 44. Sulaymon, A. H., Mohammed, S. a. M., & Abbar, A. H. (2014). Characterization and Electrochemical Preparation of Thin Films of Binary Heavy Metals (Cu-Pb,Cu-Cd,Cu-Zn) from Simulated Chloride Wastewaters. *International Journal of Electrochemical Science*, 9(11), 6328–6351. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)10891-1](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)10891-1)
 45. Kejzlar, P., Machuta, J., & Nová, I. (2017). Comparison of the Structure of CuZn40MnAl Alloy Casted into Sand and Metal Moulds. *Manufacturing Technology*, 17(1), 44–48. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/mt/17/1/44>

Anexo 1

Propiedades de los bronce usados como matriz.

Estándar (C84400)

Propiedades mecánicas	Métrico	Inglés
Dureza Brinell	55	55
Resistencia a la tracción, máxima	235MPa _	34100 psi
Resistencia a la tracción, rendimiento	105 MPa _ @Deformación 0,500 %	15200 psi @Deformación 0,500 %
Alargamiento en rotura	26 %	26 %
Módulo de elasticidad	90,0 GPa	13100 ksi
maquinabilidad	90 %	90 %
Impacto Izod	11,0 J	8,11 libras-pie

Figura 42. Propiedades mecánicas Bronce Estándar MATWEB [38]

SAE 62 (C90500)

Propiedades mecánicas	Métrico	Inglés
Dureza Brinell	75	75
Resistencia a la tracción, máxima	310MPa _	45000 psi
Resistencia a la tracción, rendimiento	150MPa _	21800 psi
Alargamiento en rotura	25 %	25 %
Módulo de elasticidad	105 GPa	15200 ksi
Fuerza compresiva	275 MPa	39900 psi
Resistencia a la fatiga	90,0 MPa @# de ciclos 1,00e+8	13100 psi @# de ciclos 1.00e+8
maquinabilidad	30 %	30 %
Impacto Izod	14,0 J	10,3 pies-libra

Figura 43. Propiedades mecánicas Bronce SAE 62 MATWEB [39]

Mechanical properties

Young's modulus	ⓘ	79	-	82	GPa
Specific stiffness	ⓘ	8.97	-	9.33	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	ⓘ	130	-	170	MPa
Tensile strength	ⓘ	250	-	340	MPa
Specific strength	ⓘ	14.8	-	19.3	kN.m/kg
Elongation	ⓘ	5	-	16	% strain
Tangent modulus	ⓘ	1.26e3			MPa
Compressive strength	ⓘ	* 130	-	170	MPa
Flexural modulus	ⓘ	* 79	-	82	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	ⓘ	130	-	170	MPa
Shear modulus	ⓘ	* 29.2	-	30.3	GPa
Bulk modulus	ⓘ	* 85.3	-	88.6	GPa
Poisson's ratio	ⓘ	0.34	-	0.35	
Shape factor	ⓘ	28			
Hardness - Vickers	ⓘ	70	-	95	HV
Elastic stored energy (springs)	ⓘ	107	-	177	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	ⓘ	* 130	-	159	MPa
Fatigue strength model (stress amplitude)	ⓘ	* 106	-	195	MPa

Figura 44. Propiedades mecánicas Bronce SAE 62 Ansys Granta 2023 [41]

SAE 64 (C93700)

Propiedades mecánicas	Métrico	Inglés
Dureza Brinell	60	60
Resistencia a la tracción, máxima	240MPa	34800 psi
Resistencia a la tracción, rendimiento	125 MPa @Deformación 0,500 %	18100 psi @Deformación 0,500 %
Alargamiento en rotura	20 %	20 %
Módulo de tracción	75,8 GPa	11000 ksi
Fuerza compresiva	90,0 MPa	13100 ps
Resistencia a la fatiga	90,0 MPa @# de ciclos 1,00e+8	13100 psi @# de ciclos 1.00e+8
maquinabilidad	80 %	80 %
Impacto Izod	7.00J	5,16 pies-libra
Impacto Charpy	15,0 J	11,1 pies-libra

Figura 45. Propiedades mecánicas Bronce 64 MATWEB [40]

Mechanical properties

Young's modulus	(i)	72	- 74	GPa
Young's modulus with temperature Parámetros : Temperature = 23°C	(i)	74.4	- 74.4	GPa
Specific stiffness	(i)	* 8.13	- 8.35	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	(i)	95	- 140	MPa
Yield strength with temperature Parámetros : Temperature = 23°C	(i)	113	- 113	MPa
Tensile strength	(i)	190	- 270	MPa
Specific strength	(i)	* 10.7	- 15.8	kN.m/kg
Elongation	(i)	5	- 15	% strain
Tangent modulus	(i)	1.12e3		MPa
Compressive strength	(i)	* 95	- 140	MPa
Flexural modulus	(i)	* 72	- 74	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	(i)	* 95	- 140	MPa
Shear modulus	(i)	* 26.6	- 27.4	GPa
Bulk modulus	(i)	* 77.8	- 79.9	GPa
Poisson's ratio	(i)	0.34	- 0.35	
Shape factor	(i)	28		
Hardness - Vickers	(i)	65	- 85	HV
Elastic stored energy (springs)	(i)	* 63.8	- 130	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	(i)	* 109	- 137	MPa
Fatigue strength model (stress amplitude)	(i)	* 86.8	- 172	MPa

Figura 46. Propiedades mecánicas Bronce SAE 64 Ansys Granta 2023 [42]

Anexo 2

Ejemplo de un cálculo para obtener las masas de polvos para la fabricación de las probetas.

Suponiendo un 1% de grafito:

Dimensiones:

$$\text{Diámetro} = \frac{1}{2} [\text{in}] = 1.27 [\text{cm}]$$

$$\text{Altura} = \frac{1}{2} [\text{in}] = 1.27 [\text{cm}]$$

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * (0.635 [\text{cm}])^2 * 1.27 [\text{cm}] = 1.6088 [\text{cm}^3]$$

Donde:

$V = \text{Volumen} [\text{cm}^3]$

$r = \text{Radio} [\text{mm}]$

$h = \text{Altura [mm]}$

Aplicando una regla de 3:

$$V = 1.6088 \text{ [cm}^3\text{]} \rightarrow 100\%$$

$$V_{\text{graf}_{1\%}} = 0.0161 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$V_{\text{Bronce}} = 1.5927 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Para obtener las masas:

$$m = V * \rho$$

Donde:

$m = \text{Masa [g]}$

$V = \text{Volumen [cm}^3\text{]}$

$\rho = \text{Densidad } \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$

Considerando una densidad de 8.96 [g/cm³] para el bronce y 2.27 [g/cm³] para el grafito:

$$m_{\text{graf}_{1\%}} = 0.0161 \text{ [cm}^3\text{]} * 2.27 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] = 0.0365 \text{ [g}_{\text{graf}}\text{]}$$

$$m_{\text{Bronce}} = 1.5927 \text{ [cm}^3\text{]} * 8.96 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] = 14.2706 \text{ [g}_{\text{Bronce}}\text{]}$$

Tabla 7. Masa de las probetas.

Probeta	Porcentaje de Grafito	Masa de Grafito	Masa de Bronce
1**	3%	0.1128 [g]	13.9109 [g]
2***	1.5%	0.0548 [g]	14.1986 [g]
3***	1%	0.0373 [g]	14.2744 [g]
4**	1.5%	0.0539 [g]	14.1981 [g]

**Matriz Estándar

***Matriz SAE 62

Anexo 3

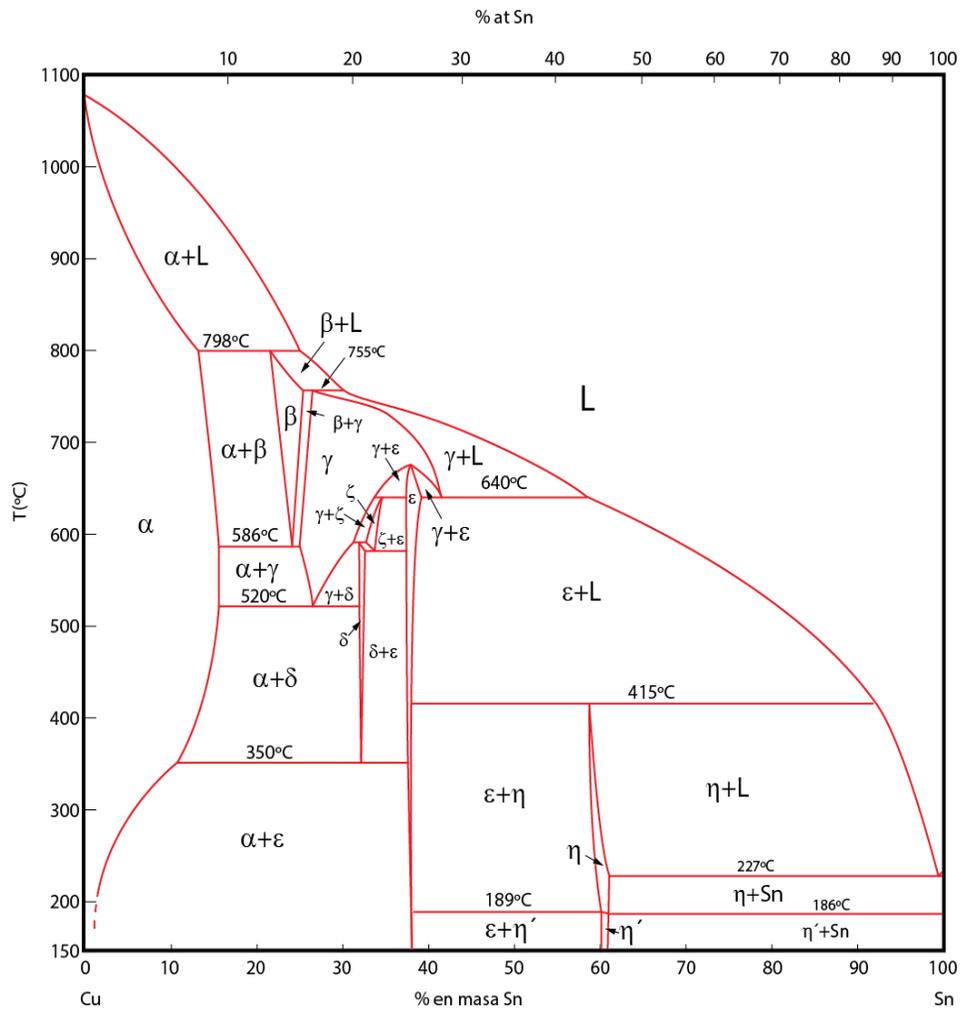


Figura 47. Diagrama de Fases Cu-Sn [43]

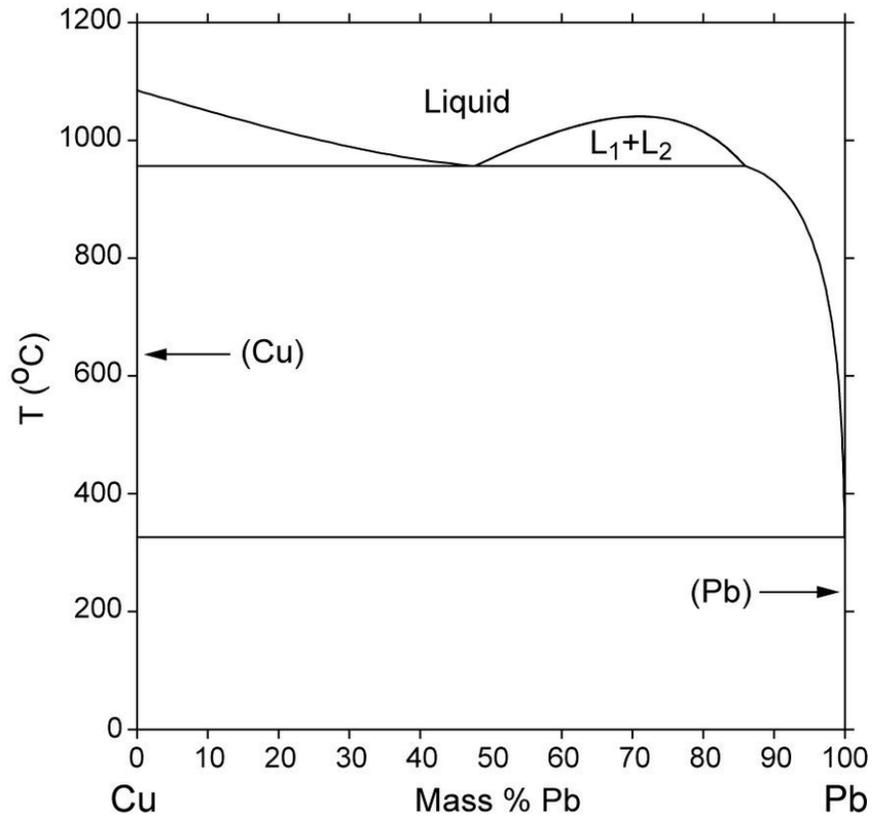


Figura 48. Diagrama de Fases Cu-Pb [44]

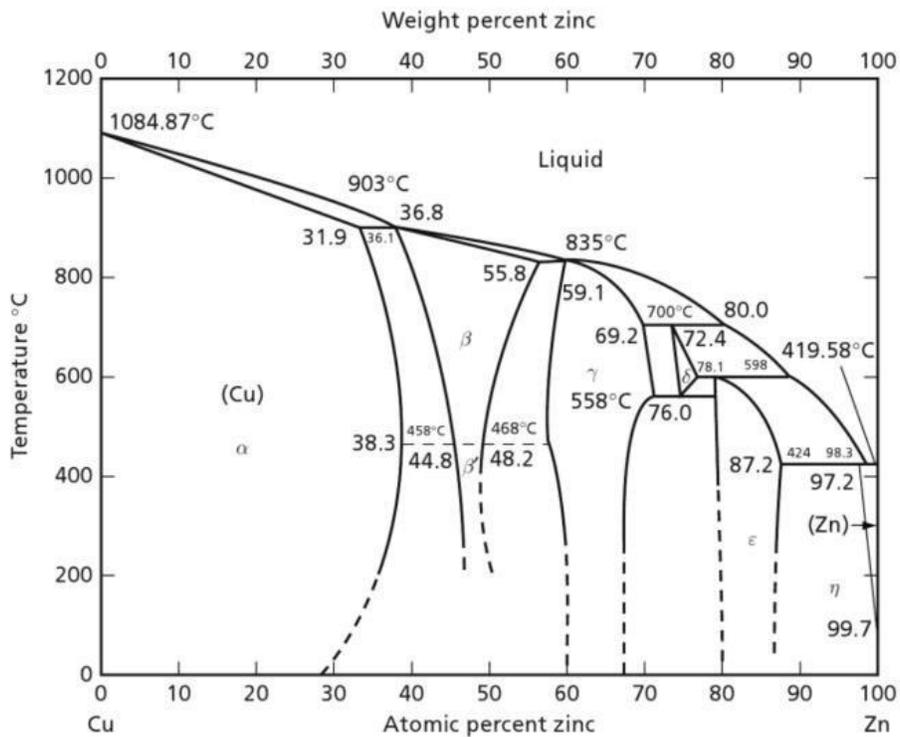


Figura 49. Diagrama de Fases Cu-Zn [45]

Anexo 4

Conteo de zonas entre partículas utilizando el software Image Pro-Plus.

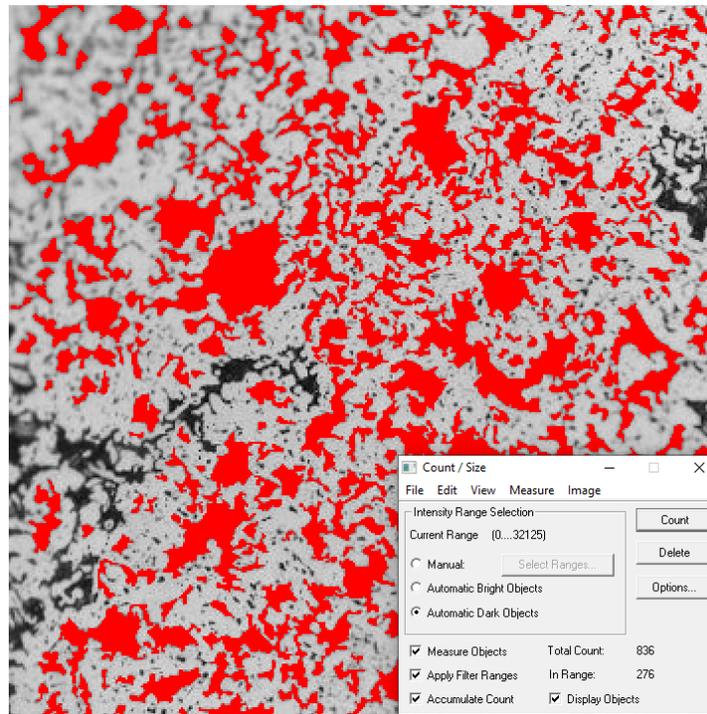


Figura 50. Zonas interparticulas Conjine muestra

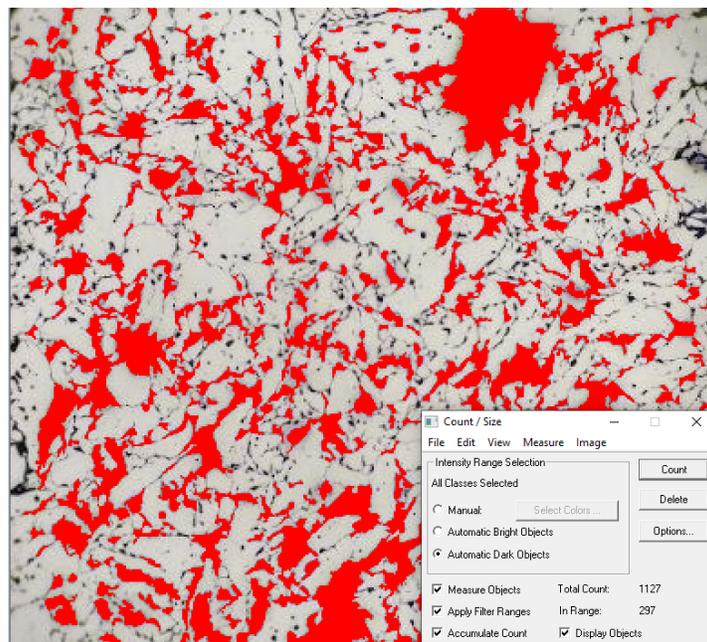


Figura 51. Zonas interparticulas Condiciones de trabajo 1

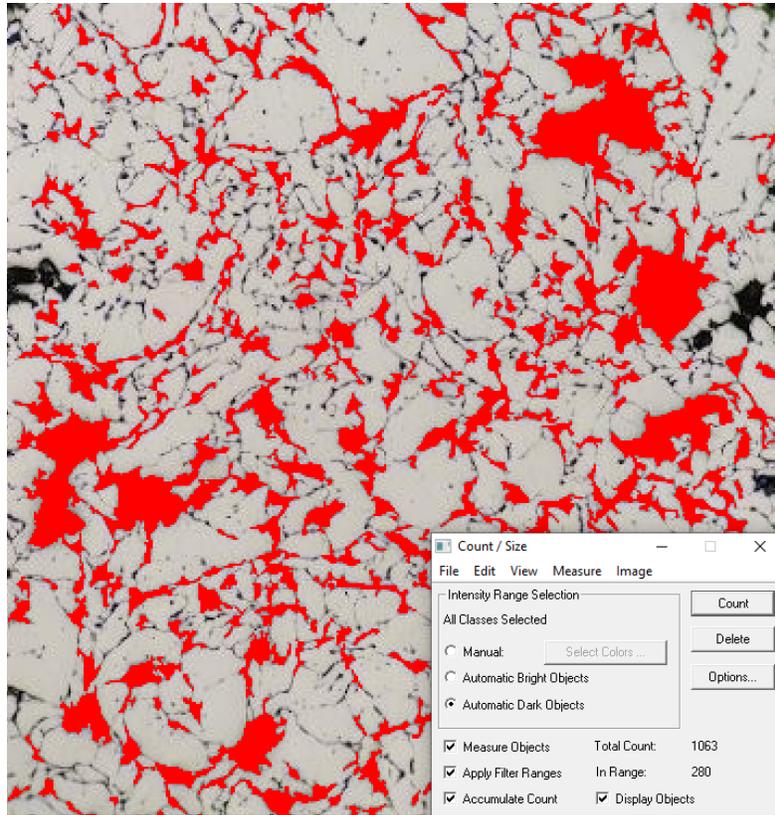


Figura 52. Zonas interpartículas Condiciones de trabajo 2

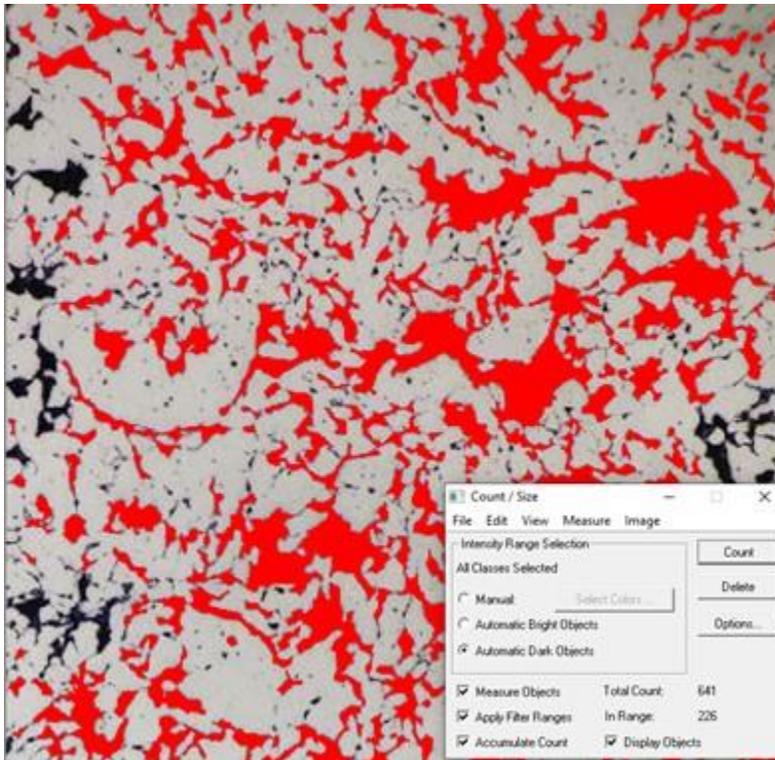


Figura 53. Zonas interpartículas Condiciones de trabajo 3

Anexo 5

Micrografías diferentes niveles de refuerzo.

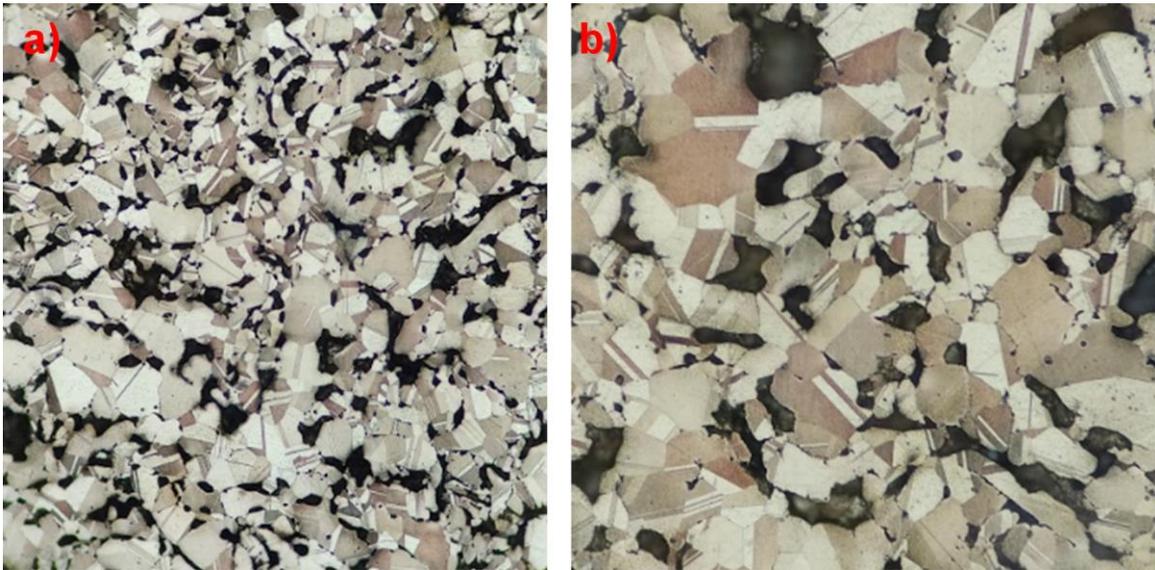


Figura 54. Probeta Blanco a)10x b)20x

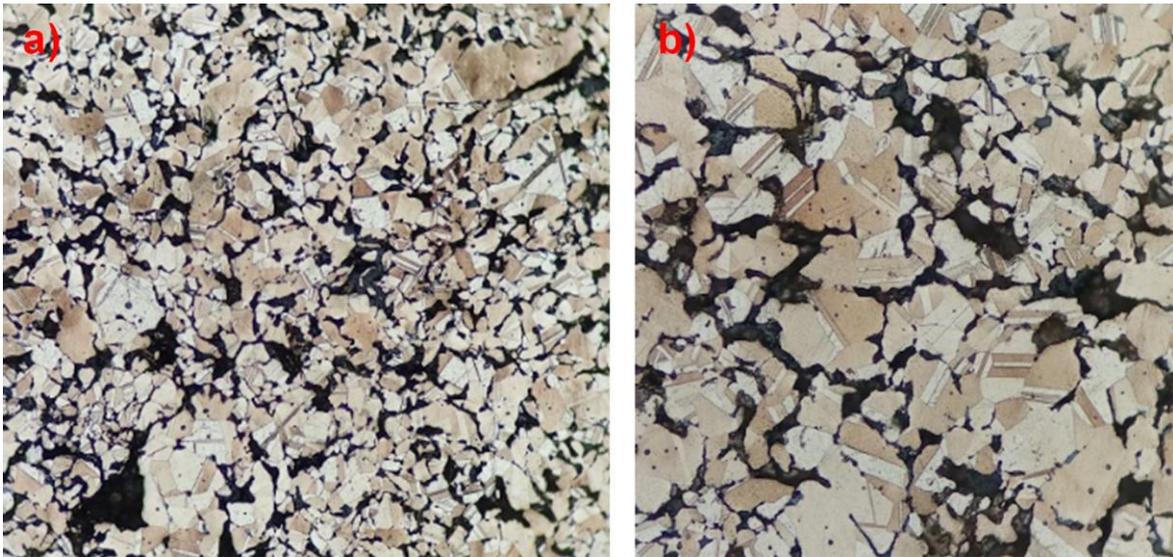


Figura 55. Probeta 1% de partículas de grafito a)10x b)20x

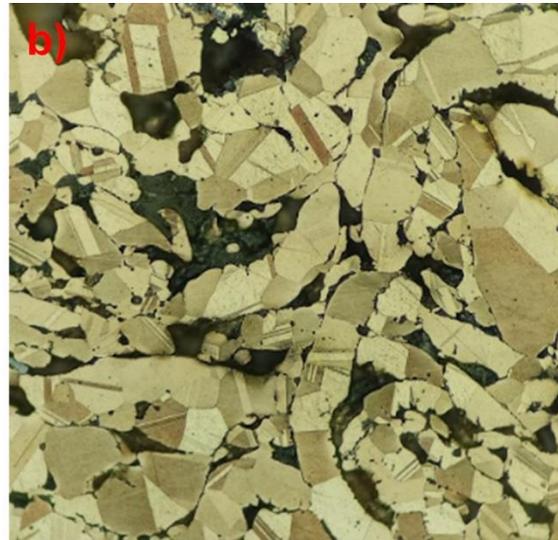
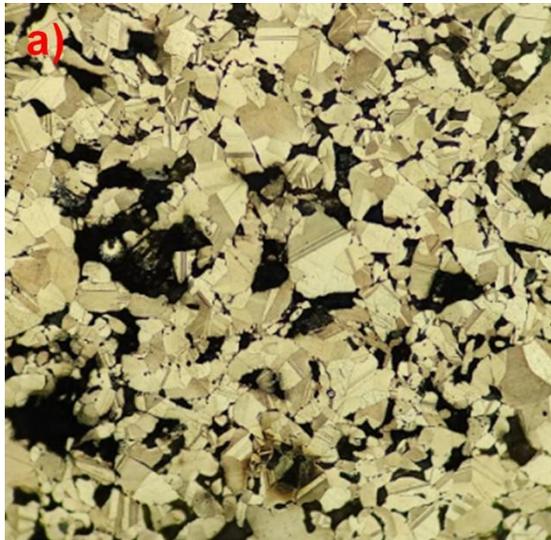


Figura 56. Probeta 2% de grafito a)10x b)20x



Figura 57. Probeta 3% de partículas de grafito a)10x b)20x

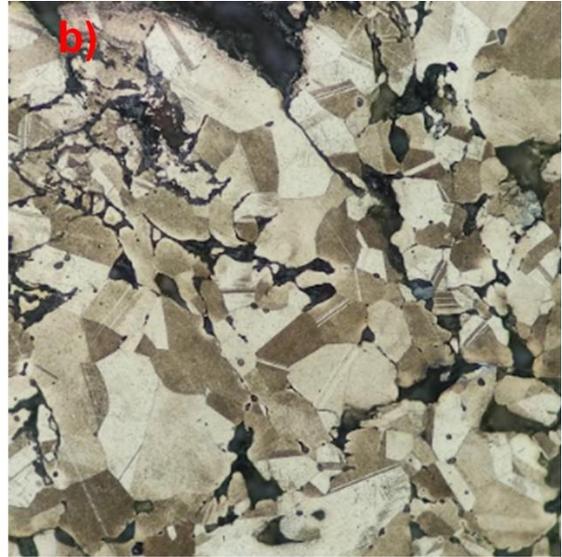
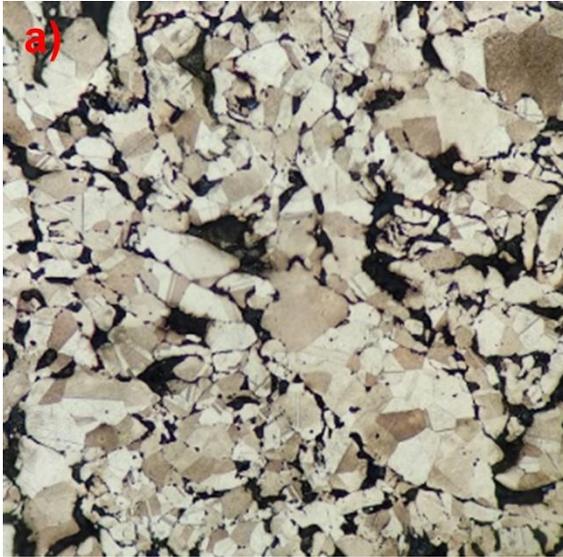


Figura 58. Probeta 2% Grafito 1% SiCp a)10x b)20x

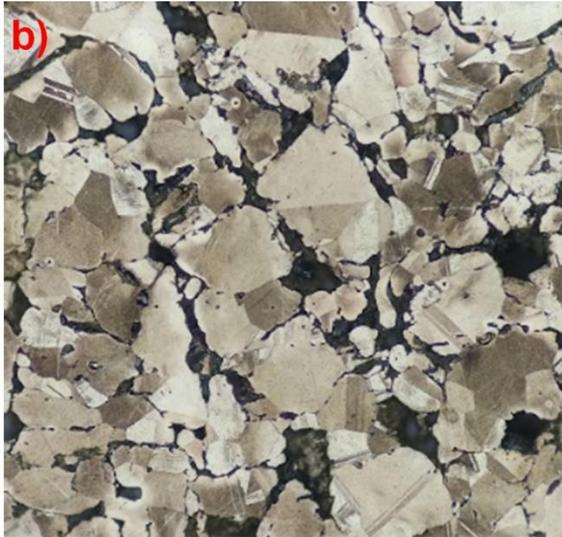
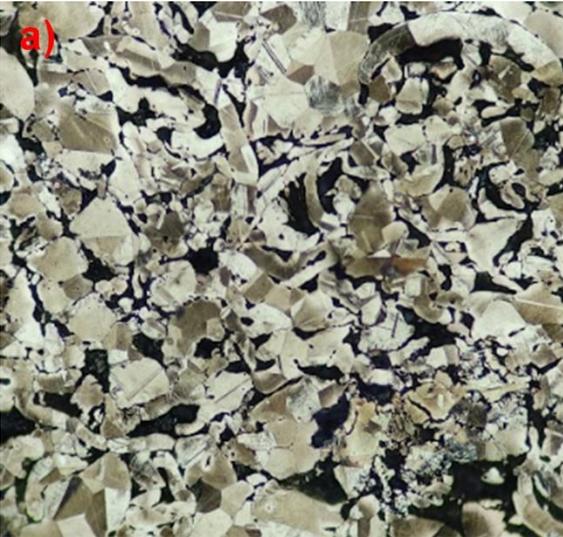


Figura 59. Probeta 2% Grafito 3% SiCp a)10x b)20x

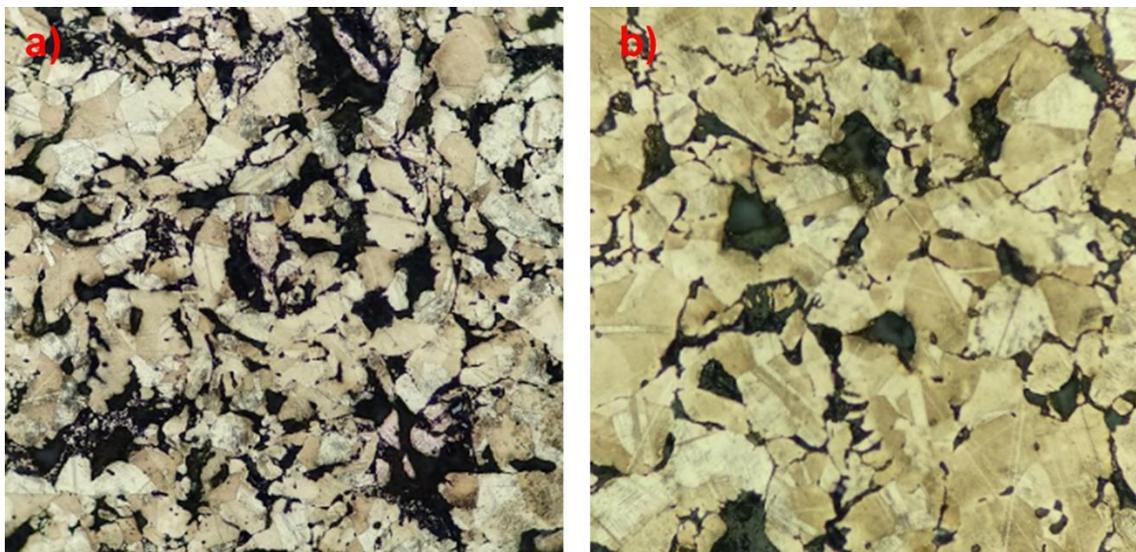


Figura 60. Probeta 2% Grafito 5% SiCp a)10x b)20x

Anexo 5

Graficas de ensayo de desgaste individuales

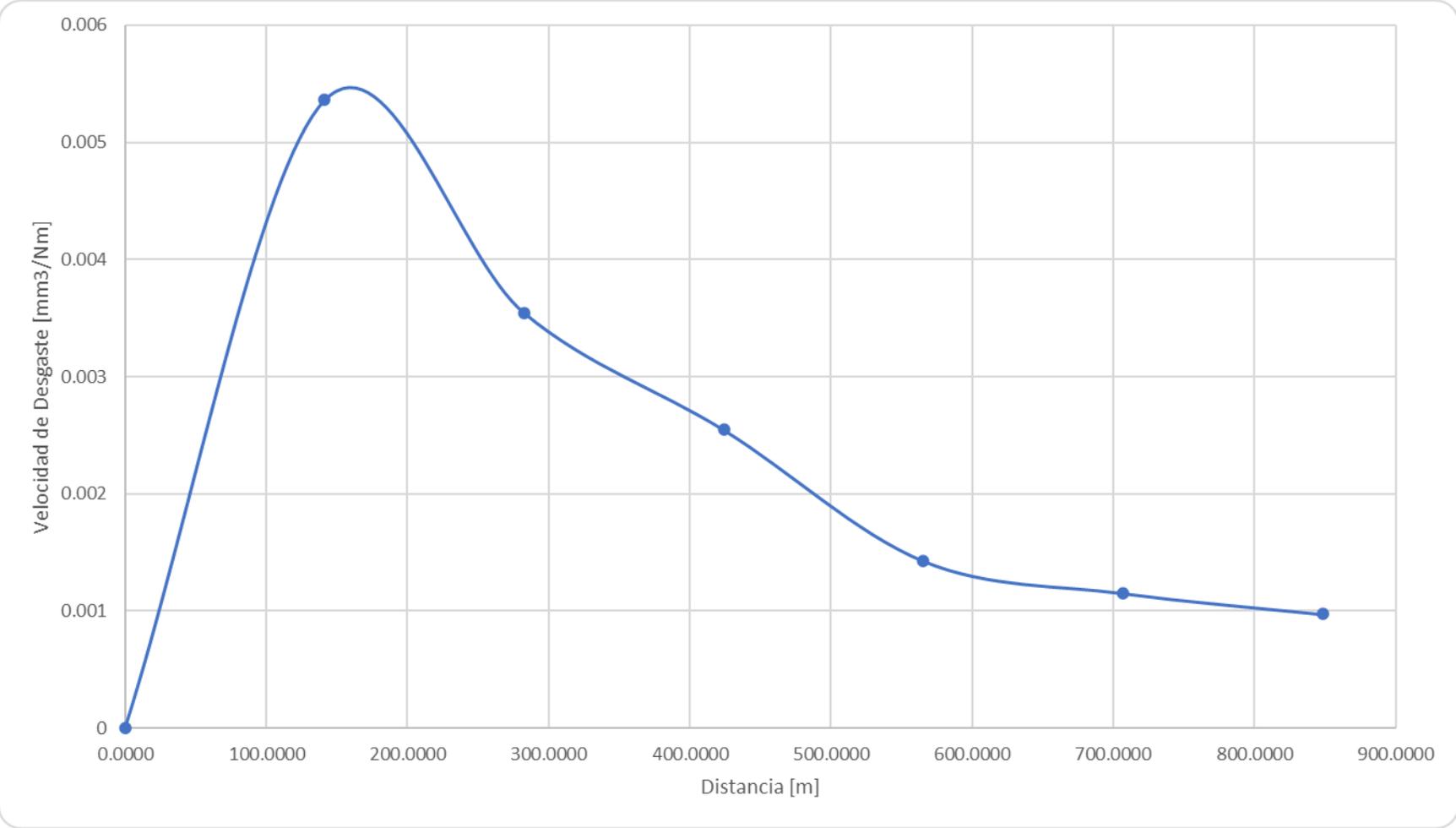


Figura 61. Ensayo de desgaste cojinete muestra

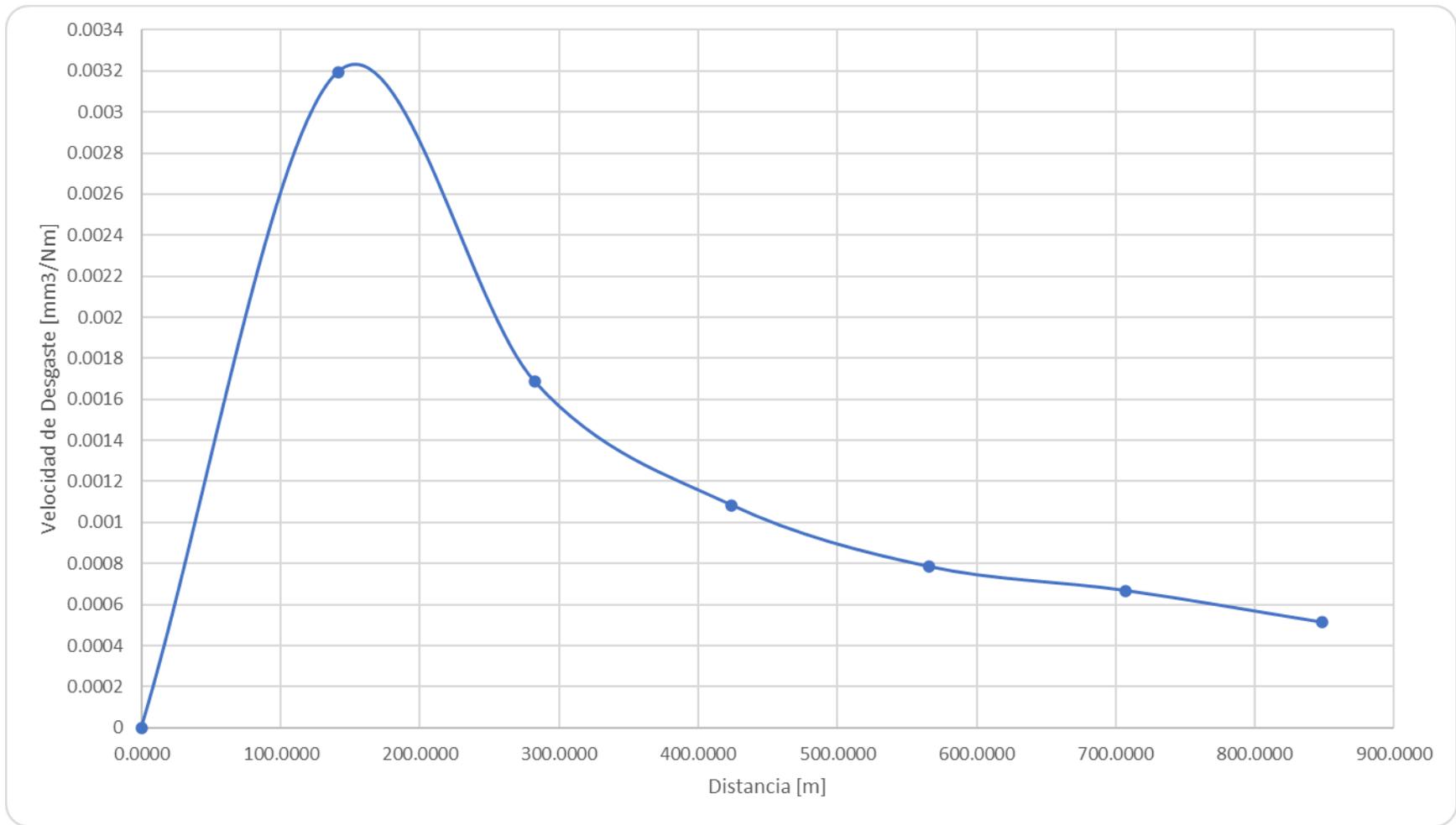


Figura 62. Ensayo de desgaste condiciones de trabajo 1.

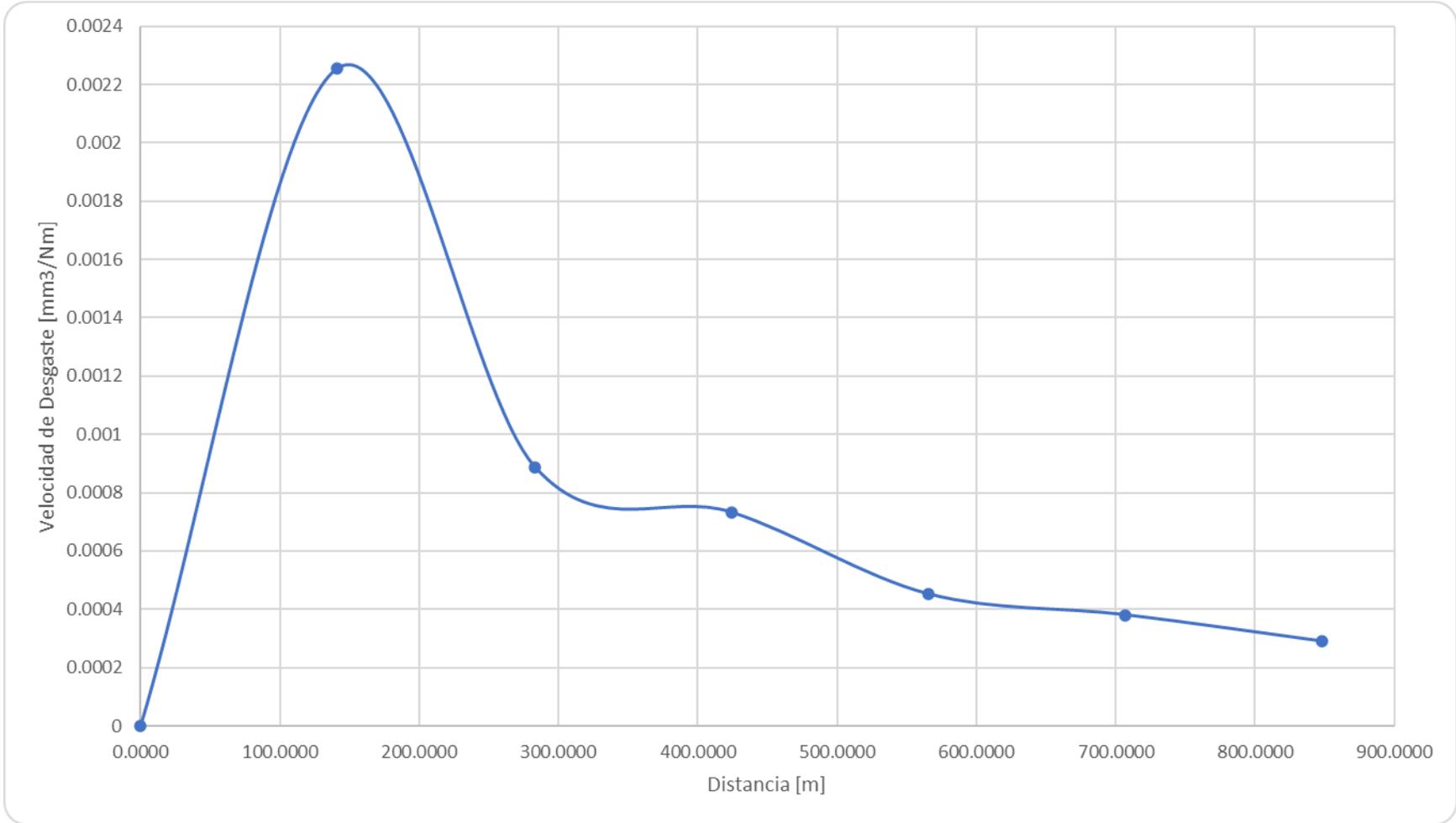


Figura 63. Ensayo de desgaste condiciones de trabajo 2.

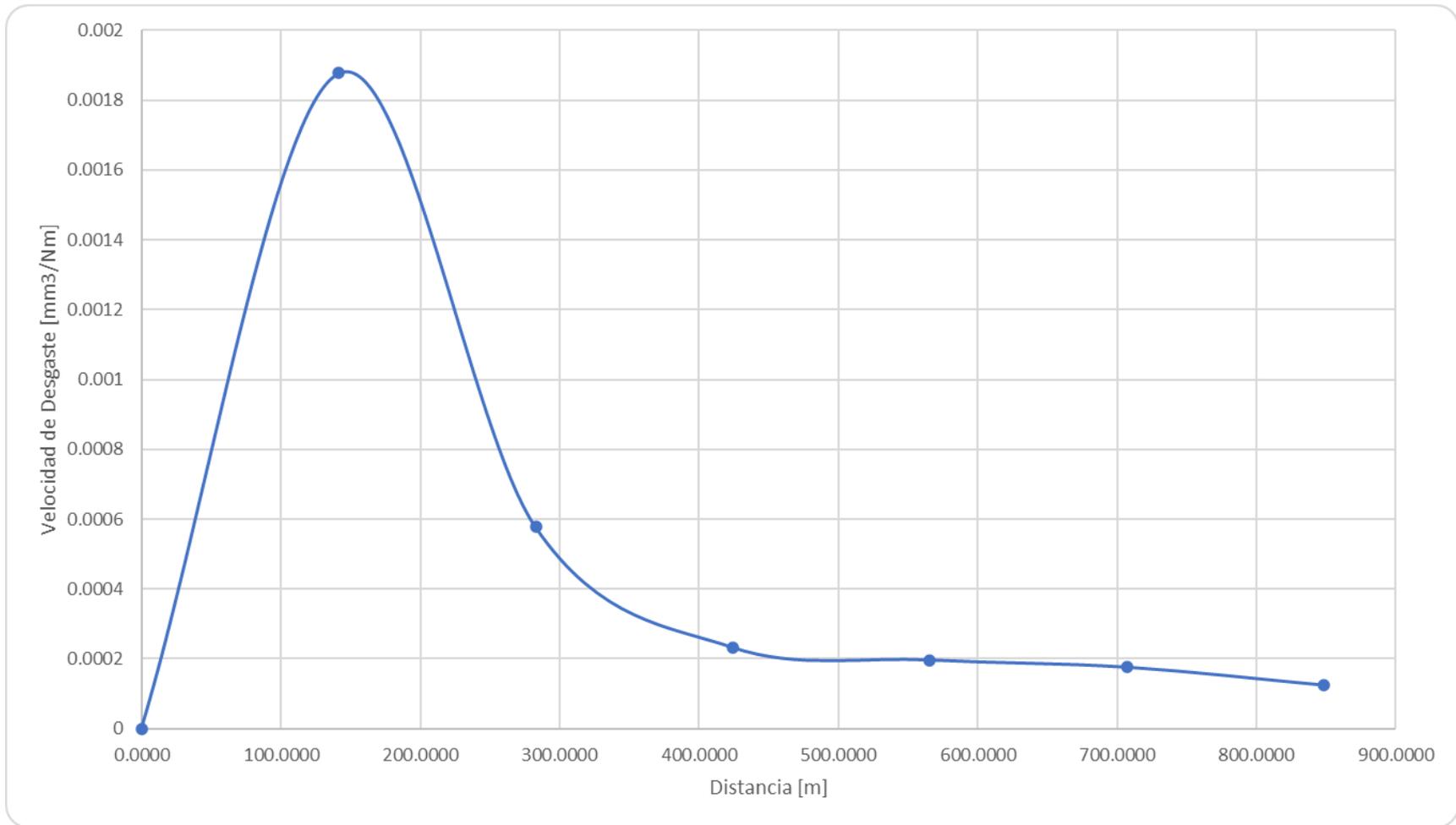


Figura 64. Ensayo de desgaste condiciones de trabajo 3.

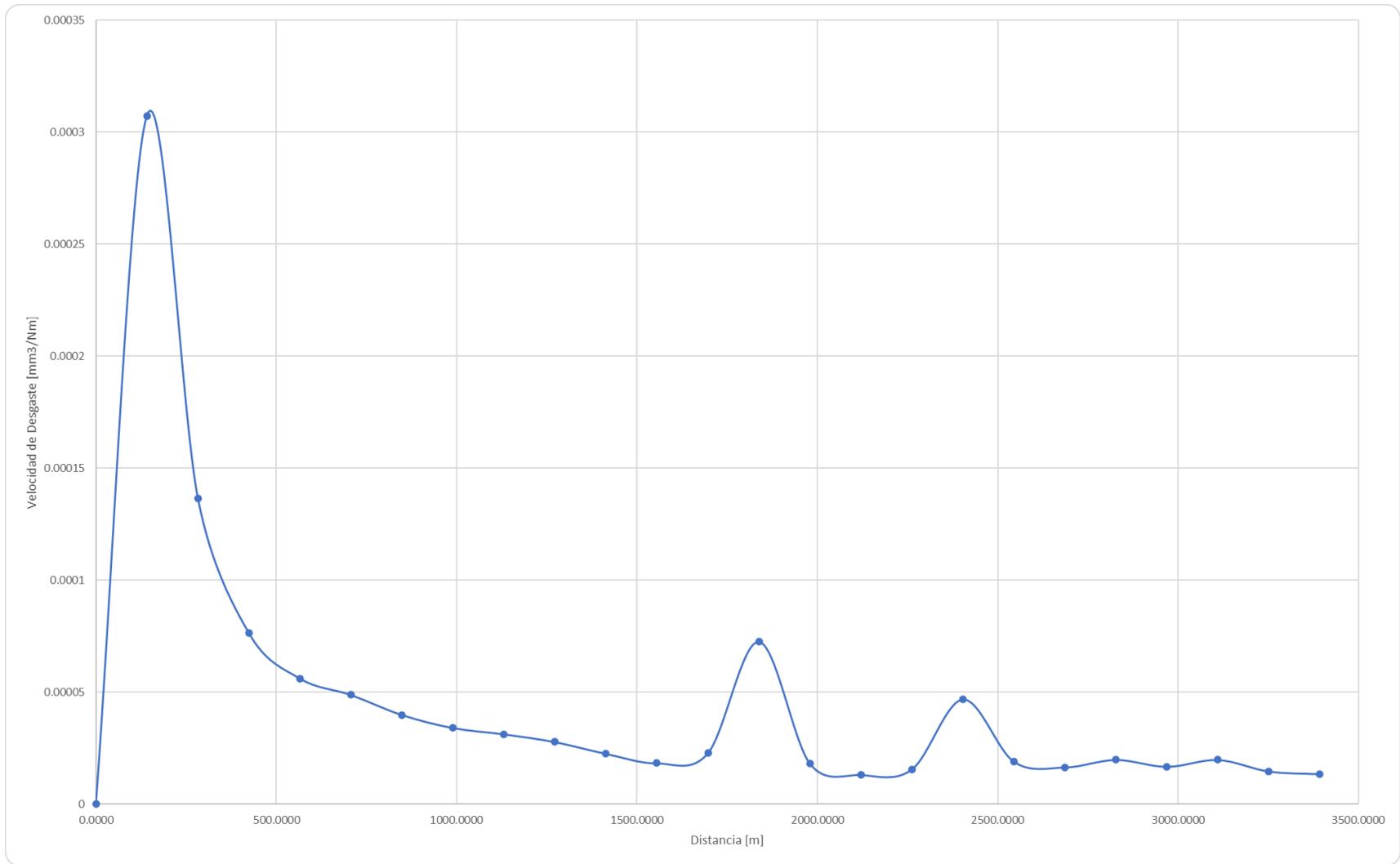


Figura 65. Ensayo de desgaste probeta blanco (SAE 62)

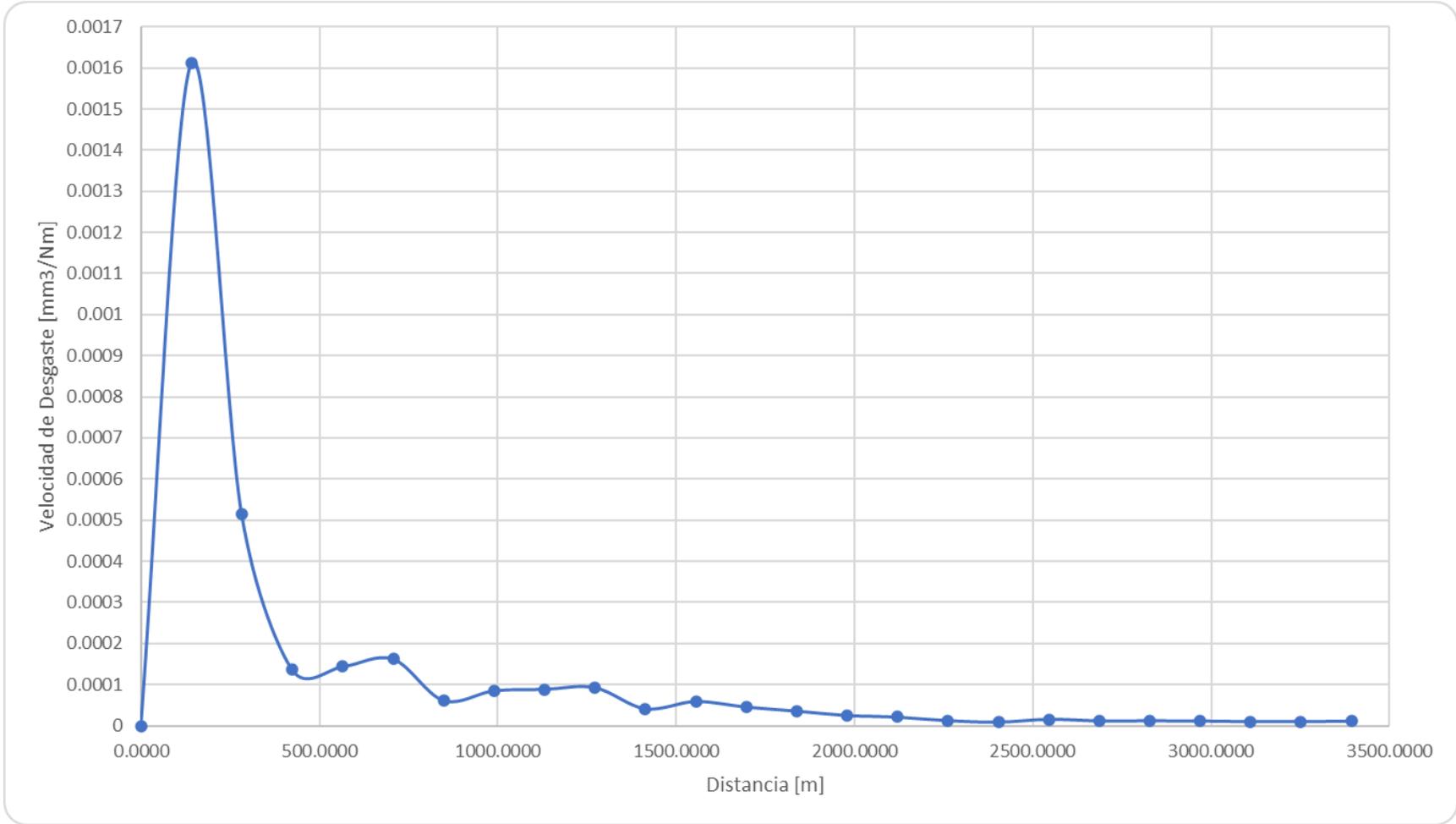


Figura 66. Ensayo de desgaste probeta 1% de grafito.

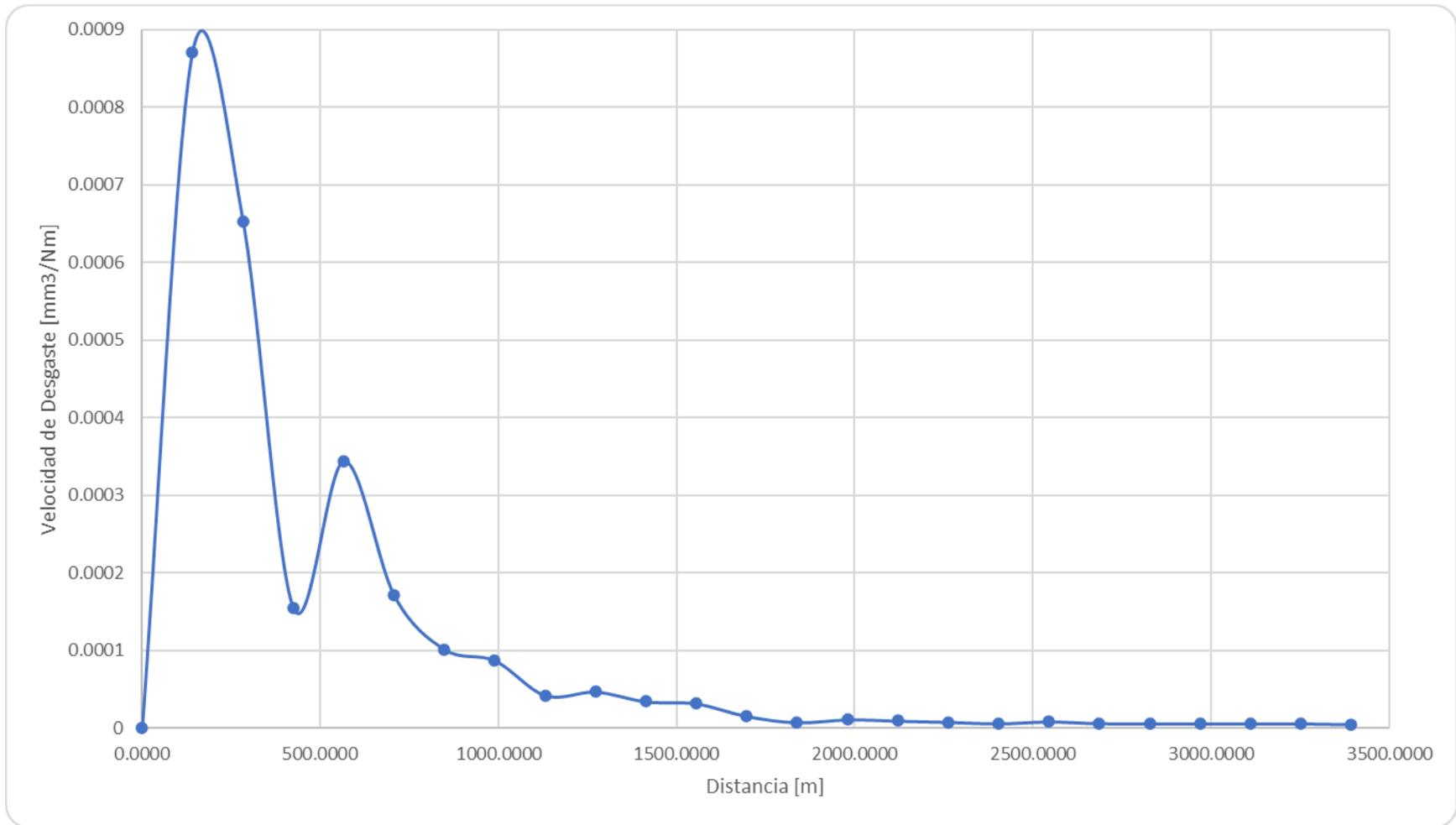


Figura 67. Ensayo de desgaste probeta 2% de grafito.

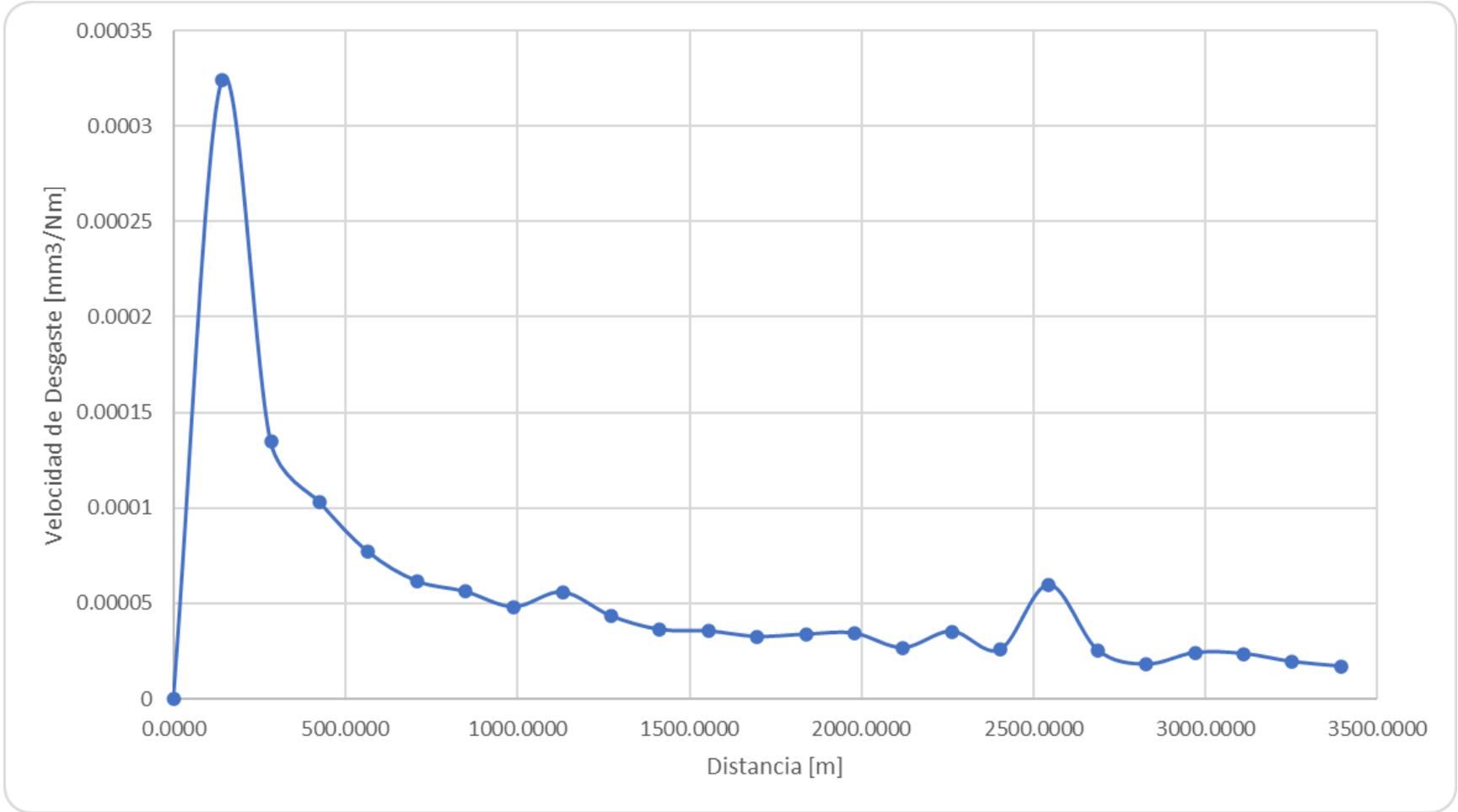


Figura 68. Figura 69. Ensayo de desgaste probeta 3% de grafito

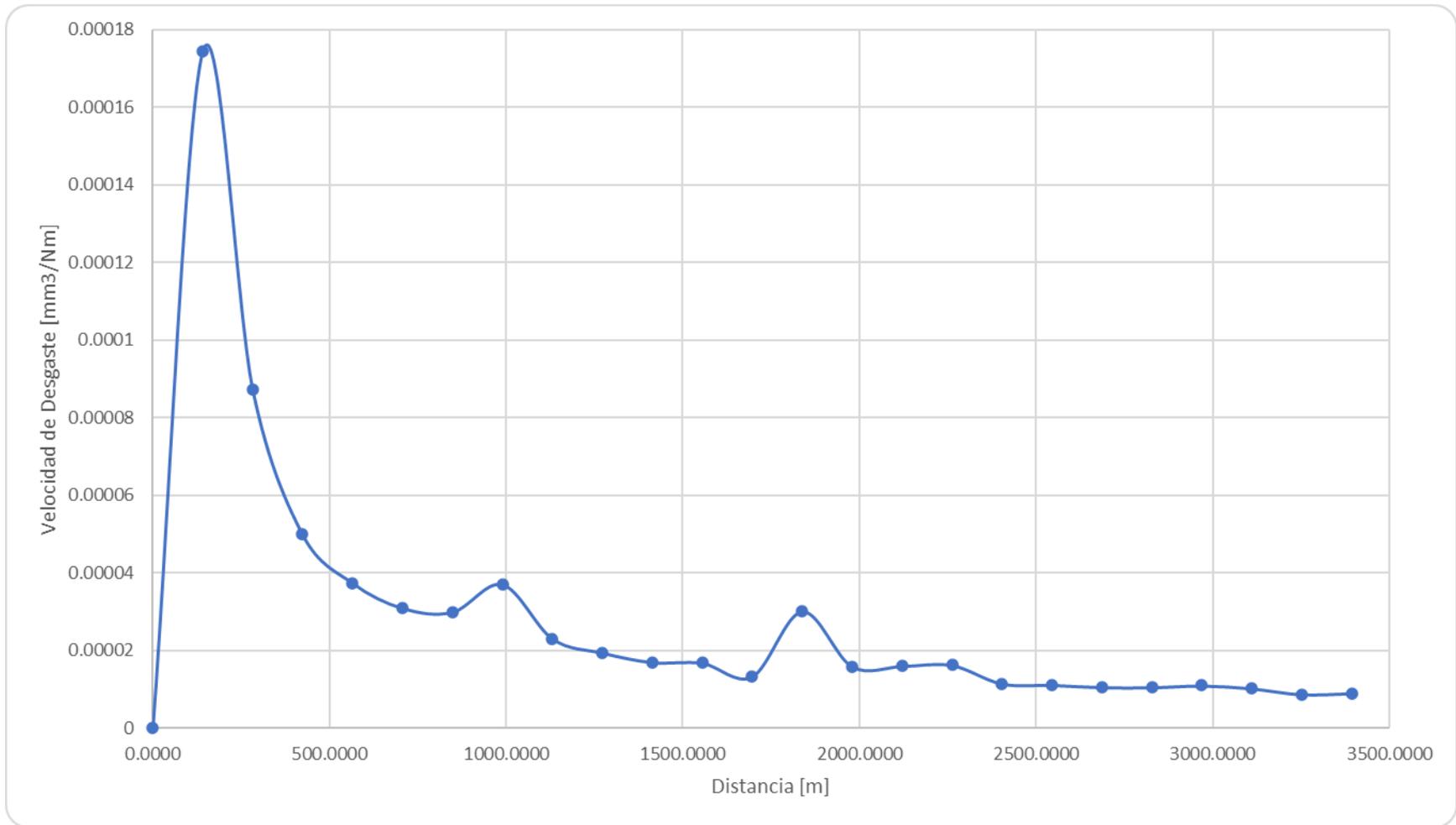


Figura 70. Ensayo de desgaste probeta 1% de SICp.

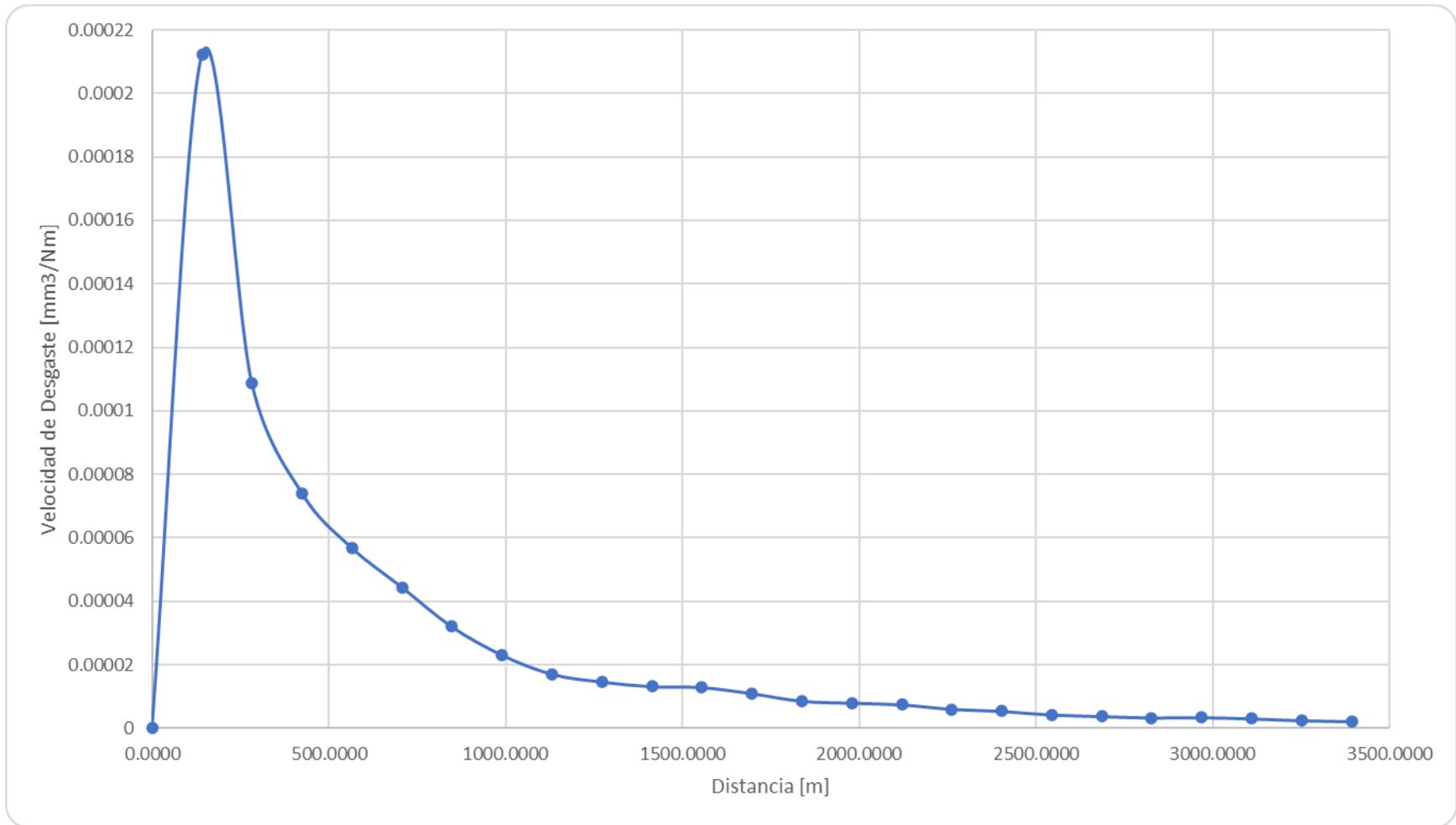


Figura 71. Ensayo de desgaste probeta 3% de SICp.

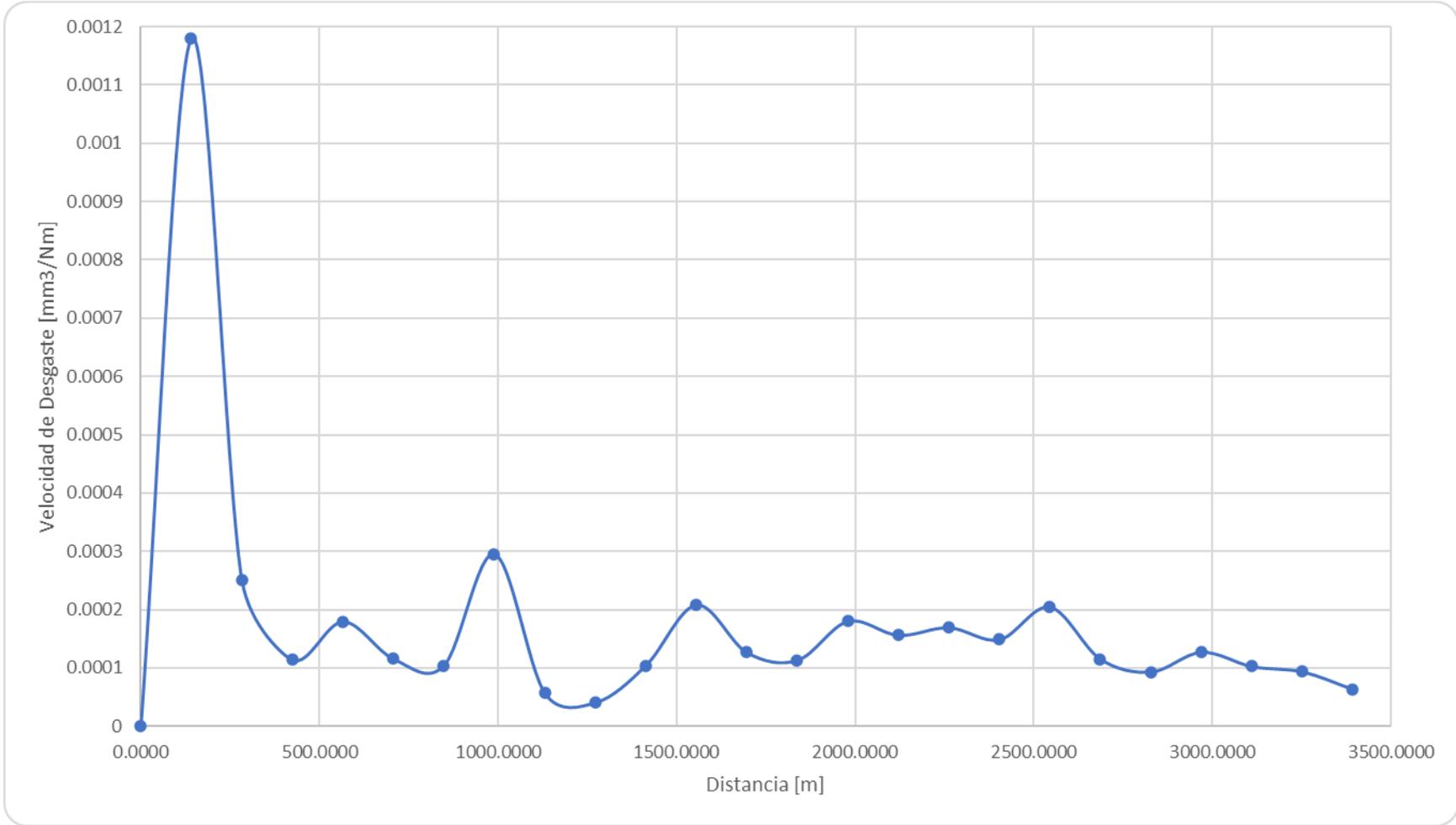


Figura 72. Ensayo de desgaste probeta 5% de SiC_p.