



# Universidad Nacional Autónoma de México



## Facultad de Ingeniería

Caracterización tribológica de fundiciones de CuMgSn mediante  
tribometría coaxial

### TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presenta:

Ivan Ortega Peraya

Director: Rafael Schouwenaars Franssens

Ciudad universitaria, 2014

## Agradecimientos

Al ángel y huracán que vino a acompañarme durante el desarrollo más difícil de este trabajo y al cual dedico también. Ingrid Guadalupe Ortega Mejía: QDP

A mis padres Flavio Ortega, Cruz Peraya, por haberme inculcado los valores que poseo, el siempre luchar, el honor y la lealtad.

A mis hermanos Erwin Ortega, Alejandro Ortega por su incondicional apoyo, la lealtad porque es la que nos hace familia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme un lugar muypreciado.

A la Facultad de Ingeniería y a sus profesores que la conforman, por haberme abierto sus puertas y por brindarme su conocimiento.

A la UDIATEM y al equipo que lo conforma

---

# Índice

|  |    |
|--|----|
| Resumen  | 6  |
| Objetivos  | 8  |
| Capítulo 1.- Introducción  | 9  |
| 1.1 Cojinetes de deslizamiento   | 12 |
| 1.2 Aleaciones para cojinetes de deslizamiento                           | 13 |
| 1.2.1 Babbitts   | 13 |
| 1.2.2 Aleaciones base Cobre  | 13 |
| 1.2.3 Aleaciones de Aluminio   | 14 |
| 1.2.4 Aleaciones de fundición gris                                       | 15 |
| 1.3 Estudio de nuevas aleaciones tribológicas                            | 15 |
| Capítulo 2. Antecedentes   | 17 |
| 2.1 Tribología   | 17 |
| 2.1.1 Desgaste   | 19 |
| 2.1.2 Fricción   | 21 |
| 2.1.3 Lubricación  | 23 |
| 2.2 Textura de la superficie   | 23 |
| 2.3 Perfilometría  | 25 |
| 2.3.1 Tipos de Perfilómetros   | 26 |
| 2.3.2 Perfilómetro óptico  | 26 |
| 2.3.3 Sondas ópticas   | 28 |
| 2.4 Tribómetro coaxial   | 29 |
| 2.5 Modelado del experimento   | 30 |
| Capítulo 3. Experimentación  | 32 |
| 3.1 Ensayo tribológico   | 32 |
| 3.1.1 Material de contraparte tribológica                                | 33 |
| 3.1.2 Preparación previa al ensayo tribológico de las probetas           | 33 |
| 3.1.3 Medición de rugosidad previa al ensayo tribológico                 | 34 |
| 3.2 Realización del ensayo tribológico                                   | 34 |
| 3.2.1 Caracterización del material ensayado mediante tribometría coaxial | 36 |

---

|   |    |
|---|----|
| 3.2.2 Medición de masa de probetas                          | 36 |
| 3.2.3 Medición de rugosidad posterior al ensayo tribológico | 36 |
| 3.2.4 Microscopía óptica y electrónica                      | 36 |
| Capítulo 4. Resultados                                      | 39 |
| 4.1 Evaluación del material                                 | 39 |
| 4.1.1 Rugosidad   | 40 |
| 4.2 Evaluación del material Cu-1%Mg-1%Sn                    | 41 |
| 4.2.1 Caracterización de microestructuras                   | 42 |
| 4.2.2 Medición de masa                                      | 43 |
| 4.2.3 Caracterización de las superficies                    | 44 |
| 4.2.4 Evolución de microestructuras                         | 48 |
| 4.2.5 Curvas de fricción                                    | 49 |
| 4.3 Evaluación del material Cu-5%Mg-1%Sn                    | 51 |
| 4.3.1 Caracterización de microestructuras de Cu-5%Mg-1%Sn   | 52 |
| 4.3.2 Medición de masa                                      | 52 |
| 4.3.3 Ensayo tribológico                                    | 53 |
| 4.3.4 Caracterización de superficies Cu-5%Mg-1%Sn           | 53 |
| 4.3.5 Evolución de Microestructuras                         | 56 |
| 4.3.6 Curvas de fricción                                    | 59 |
| 4.4 Evaluación del material Cu-5%Mg-5%Sn                    | 60 |
| 4.4.1 Caracterización de microestructuras Cu-5%Mg-5%Sn.     | 61 |
| 4.4.2 Medición de masa                                      | 62 |
| 4.4.3 Ensayo tribológico                                    | 63 |
| 4.4.4 Caracterización de superficies Cu-5%Mg-5%Sn           | 63 |
| 4.4.5 Evolución de microestructuras                         | 66 |
| 4.4.6 Curvas de fricción Cu-5Mg-5Sn                         | 68 |
| 4.5 Evaluación del material Cu-1%Mg-5%Sn                    | 69 |
| 4.5.1 Caracterización de microestructuras Cu-1%Mg-5%Sn.     | 70 |
| 4.5.2 Medición de masa                                      | 71 |
| 4.5.3 Ensayo tribológico                                    | 71 |
| 4.5.4 Caracterización de superficies Cu-1%Mg-5%Sn           | 72 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 4.5.5 Evolución de microestructuras | 76 |
| 4.5.6 Curvas de fricción Cu-1Mg-5Sn | 78 |
| Capítulo 5.- Discusión              | 79 |
| 5.1 Resumen de resultados           | 79 |
| 5.2 Ensayo tribológico              | 79 |
| 5.3 Desgaste                        | 82 |
| 5.4 Microestructuras                | 83 |
| 5.5 Recomendaciones a futuro        | 84 |
| Capítulo 6.- Conclusiones           | 86 |
| Bibliografía                        | 87 |

## Resumen

El actual desarrollo de motores de combustión interna y de maquinaria en general, ha dado lugar a la investigación de nuevas aleaciones tribológicas que logren disminuir la fricción entre componentes y con esto disminuir las pérdidas energéticas y económicas.

En el presente trabajo se han analizado y caracterizado el comportamiento tribológico de una clase de aleaciones desarrolladas en la Facultad de Ingeniería con las siguientes composiciones (en % peso) de Cu-1%Mg-1%Sn, Cu-1%Mg-5%Sn, Cu-5%Mg-1%Sn y Cu-5%Mg-5%Sn para poder compararlas y evaluar sus calidades tribológicas.

Mediante un tribómetro coaxial se sometieron los materiales a ensayos de desgaste, todas las muestras fueron preparadas de igual forma. Un perno AISI 9840 (Fe-0.4%C-0.25%Si-0.8%Mn-1%Ni-0.25%Mo, % en peso) actuó como la contraparte tribológica.

El desgaste generado en las probetas se analizó mediante la medición de masas y rugosimetría óptica. Los cambios microestructurales se caracterizaron por microscopía electrónica de barrido. Por último se graficaron las curvas de fricción.



## Objetivos

- Explorar materiales de Cu-Mg-Sn mediante ensayos tribológicos, y generar zonas de mezcla mecánica que puedan ser óptimas para utilizar como material de estudio en cojinetes de deslizamiento.
- Caracterizar la topografía generada en el material antes y después del ensayo tribológico mediante profilometría óptica.
- Caracterizar metalográficamente la tribocapa obtenida durante el ensayo tribológico utilizando microscopia electrónica de barrido.
- Determinar el coeficiente de fricción entre la muestra y el perno.

## Capítulo 1.- Introducción

Con los años, los gobiernos de los países más industrializados han desarrollado estrategias amplias para reducir el desperdicio de energía [1]. La tribología fue identificada formalmente como un campo técnico importante y unificado en un informe emitido por una comisión de la Secretaría de Estado de Educación y Ciencia británico presidido por Peter Jost (1966) [2].

Muchos de los avances en la tecnología de la tribología y cojinetes evolucionaron durante años, décadas o incluso siglos para satisfacer las necesidades de nueva maquinaria. La revolución industrial, con su aumento en velocidades de rotación, trajo como consecuencia el uso de lubricación hidrodinámica en servicio de uso común general [2].

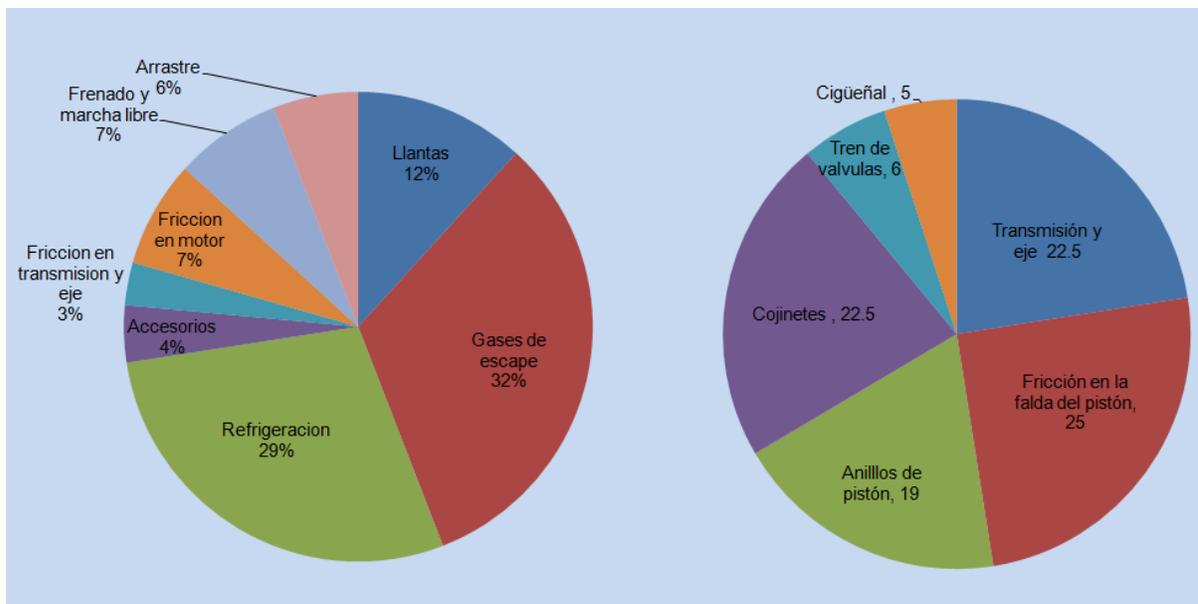
El principio en el cual se basa el funcionamiento de un motor de combustión interna es la conversión de energía química de un combustible en energía mecánica, que da movimiento a vehículos automotores [4]. Actualmente el motor de combustión interna es el componente más importante en los vehículos automotores [3].

Las eficiencias térmicas y mecánicas de un motor son relativamente bajas, con gran parte de la energía del combustible disipada en forma de calor y de fricción. El motor de combustión interna es un contribuyente a la contaminación atmosférica a través de hidrocarburos, partículas y emisiones de NO<sub>x</sub> y contribuyente al efecto invernadero a través de las emisiones de dióxido de carbono [3]. Se producen pérdidas por fricción a causa del rozamiento de todas las piezas móviles en el motor [5].

Las mejoras en el comportamiento tribológico de los motores pueden generar los siguientes beneficios:

- Reduce el consumo de combustible
- Incrementa la potencia del motor
- Reduce el uso de lubricantes de alta viscosidad
- Reducción de emisiones contaminantes
- Mejora la durabilidad, la confiabilidad y la vida del motor
- Reduce los mantenimientos requeridos y prolonga los intervalos de servicio

La energía derivada de la combustión de un combustible se distribuye en un motor y en un sistema de tren de potencia como se puede observar en la figura 1.1. En un artículo publicado por Andersson [37] se mostró la distribución de energía de combustible para un automóvil de pasajeros de tamaño medio en el ciclo urbano. Sólo el 12% de la disposición de la energía en el combustible está disponible para accionar las ruedas, 15% se disipa en forma de energía mecánica, principalmente por pérdidas por fricción.



**Figura 1.1 Distribución de energía de un vehículo ligero. En la gráfica circular del lado izquierdo se muestran las pérdidas debido a la aerodinámica, peso y térmicas. Del lado derecho se muestran las pérdidas que se generan por los elementos mecánicos debido a la fricción, y son piezas en donde se puede aplicar tribología [3].**

Con base a los datos de consumo de combustible de su publicación, una reducción del 10% en las pérdidas mecánicas daría lugar a una reducción de 1,5% en el consumo de combustible. Como se puede observar en la figura 1.2 en cuanto a consumo de energía dentro del motor la pérdida por fricción es la mayor parte (48%) del consumo de energía desarrollado en un motor de combustión interna. Las otras partes son la resistencia a la aceleración (35%) y perdidas aerodinámicas (17%) [3].

El sector transporte se ubica como uno de los principales consumidores de energía, tanto a nivel mundial como en México, además de contar con un potencial de ahorro de energía y de mitigación de emisiones de gases de efecto invernaderos (GEI). En México, el transporte nacional e internacional fue el sector con el mayor consumo de energía, 48.7% de la energía final consumida en 2009 [6].

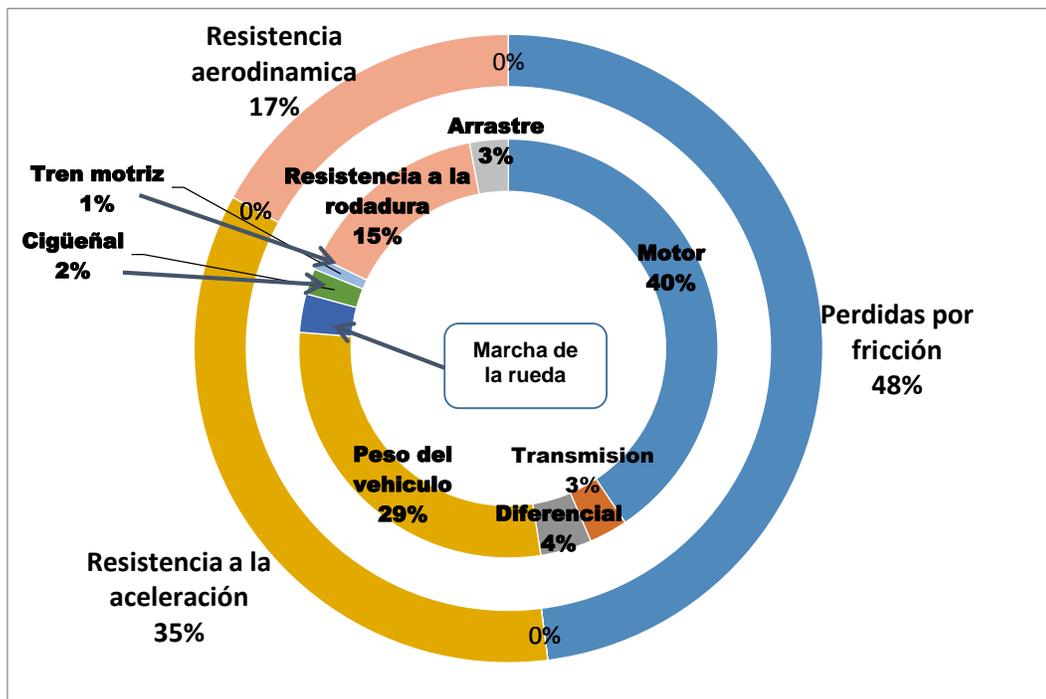
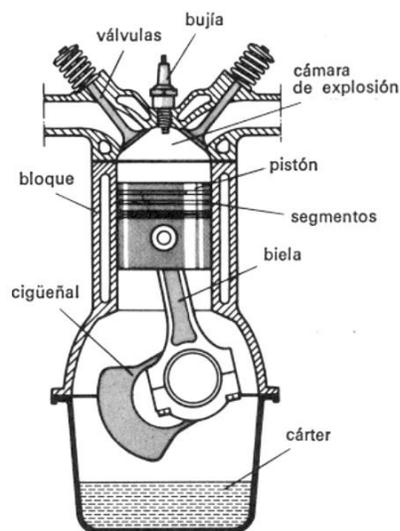


Figura 1.2 El consumo de energía desarrollado en un motor, Toyota Motors. En el gráfico circular exterior se muestran las diferentes pérdidas que se generan en un vehículo de combustión interna, cada porción exterior se desglosa en el círculo interior [3].

Las pérdidas por deficiencias tribológicas para la economía de cualquier país son enormes ya que se debe tomar en cuenta toda la energía que se desperdicia de manera simultánea en cada uno de los millones de dispositivos mecánicos utilizados a lo largo del territorio [7]. El desgaste es la principal causa de desperdicio de material y de la pérdida de rendimiento mecánico y cualquier reducción en el desgaste puede dar lugar a un ahorro considerable [8]. En su forma más avanzada, la tribología se puede integrar en el diseño de máquinas en la medida de que conduce a nuevos diseños más eficientes para los diversos tipos de maquinaria [9].



**Figura 1.3 Principales componentes de un motor de combustión interna.**

### **1.1 Cojinetes de deslizamiento**

Los cojinetes como se muestra en la figura 1.4 son elementos que restringen por lo menos un grado de libertad de los seis que posee un cuerpo rígido. Estos tienen la propiedad de ser más blandos que la contraparte tribológica, por ejemplo un cigüeñal [10]. Los cojinetes de deslizamiento protegen a los ejes rotativos, como el cigüeñal, el árbol de levas, el eje de balancines o el eje de compensación en el bloque del motor o

en la biela. Sus cargas mecánicas en el motor de combustión son extremadamente altas [11]. La mayoría de los cojinetes se pueden clasificar como cojinetes de deslizamiento en seco o semilubricados, o cojinetes de elementos rodantes [12].



**Figura 1.4 Cojinetes de desplazamiento positivo**

## **1.2 Aleaciones para cojinetes de deslizamiento**

Con respecto a las aleaciones para cojinetes, estas dependen más de la aplicación a la que serán sometidas y con esto hacer una buena selección de la aleación del cojinete.

### **1.2.1 Babbitts**

Las aleaciones de estaño normalmente contienen alrededor de 3-8% de cobre y 5-8% de antimonio. Un bajo contenido en antimonio (3-7%) y cobre (2-4%) proveen una máxima resistencia al agrietamiento por fatiga.

Las aleaciones de plomo generalmente contienen de 9-16% de antimonio y hasta 12% de estaño para proporcionar cristales duros de estaño-antimonio en una matriz eutéctica de tres metales [2].

### **1.2.2 Aleaciones base Cobre**

Los cojinetes con aleaciones base Cu se han aplicado satisfactoriamente por su buena compatibilidad con los aceros (que se explica más adelante), aleaciones con un alto contenido de plomo se dan en primera consideración por su alta compatibilidad y

resistencia al rayado en el material [2]. Bajo cargas elevadas donde es necesaria una mayor dureza y resistencia superior a los babbits o aleaciones de aluminio. Bronces de estaño contienen de 5-13% en peso de estaño y de 1-5% de Zinc; la existencia de un compuesto intermetálico duro de  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  aumentando la resistencia de las aleaciones [13].

Los cojinetes con aleaciones Cu-Pb cuentan con buena compatibilidad la cual se obtiene a partir del plomo, mientras que el cobre provee de resistencia mecánica. Una desventaja de estas aleaciones es que en estado líquido se forman dos fases no mezclables, por lo que se tiene que recurrir a la metalurgia de polvos. Otra desventaja es su baja resistencia a la corrosión, se aplica un recubrimiento de babbitt en la superficie. A estos cojinetes se les conoce como trimetálicos, por tener un recubrimiento de Babbitt en la superficie de Cu-Pb y ésta a su vez se encuentra sobre un respaldo de acero.

### **1.2.3 Aleaciones de Aluminio**

Las aleaciones de aluminio tienen dos ventajas importantes, la mayor ventaja es que tienen una alta conductividad térmica ( $236 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ). Transfieren fácilmente el calor del rodamiento, lo que resulta en una temperatura de operación más baja para el cojinete. La segunda ventaja es que tienen una suficiente resistencia a la compresión ( $34 \text{ MPa}$ ) [14].

Ejemplos de aleaciones de aluminio ampliamente utilizados en motores de automóviles son una aleación con 4% de silicio y 4% de cadmio, y las aleaciones que contengan estaño, níquel, cobre y silicio. También se utilizan aleaciones de aluminio y estaño con un contenido de 20-30% de estaño, esto para cojinetes de alta velocidad y sometidos a cargas elevadas [14].

### **1.2.4 Aleaciones de fundición gris**

En la mayoría de las aplicaciones, la dureza relativamente alta de hierro fundido lo hace inadecuado como material de soporte. En ciertas aplicaciones es útil, especialmente para la mejora de su resistencia al agarrotamiento, causada por la película de grafito formadas en su superficie. Las ventajas más importantes de hierro fundido son una alta resistencia al desgaste adhesivo, alta resistencia mecánica y un bajo costo [14].

### **1.3 Estudio de nuevas aleaciones tribológicas**

Dada la necesidad industrial de formular y desarrollar nuevas aleaciones tribológicas dúctiles para uso en motores de combustión interna. Mediante trabajos desarrollados anteriormente en la UDIATEM (Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales) como el “Desarrollo de las técnicas de producción y estudio de la solidificación de las aleaciones Cu-Mg-Sn para aplicaciones tribológicas”. Se analizaron las posibles opciones y se identificó al sistema CuMgSn como un candidato interesante para sustituir a las aleaciones Cu-Pb [15].

Típicamente, el sistema Cu-Pb ha sido utilizado en motores pesados, mientras que el uso del Al-Sn se solía ver limitado a motores compactos. El menor costo de los cojinetes basados en Al-Sn ha provocado que hayan ampliado su área de aplicación a lo largo de las décadas, pero Cu-Pb sigue ocupando una parte importante del mercado [15]. Una de las limitantes del uso de las aleaciones Cu-Pb es el reciclar el material al finalizar su vida útil, esto por el contenido de Pb que tarde o temprano de no ser bien tratado tendrá contacto con el medio ambiente.

El sistema Cu-Mg se utiliza en los cables eléctricos de trenes de alta velocidad. Tiene alta resistencia mecánica, elevada resistencia al desgaste y elevada conductividad térmica y eléctrica [15]. Para este trabajo se crearon cuatro aleaciones, siguiendo un esquema factorial tipo 2<sup>2</sup>. Las composiciones (en % peso) de Cu-1%Mg-1%Sn, Cu-

1%Mg-5%Sn, Cu-5%Mg-1%Sn y Cu-5%Mg-5%Sn usadas para determinar el rango del efecto que tiene cada elemento y su combinación en términos de ductilidad, resistencia y propiedades tribológicas.

Se realizaron trabajos previos para determinar las propiedades mecánicas de cada aleación, donde muestra una variación en las propiedades mecánicas [31]. En base a las composiciones, se puede observar que las aleaciones con mayor contenido de Mg son más frágiles y les corresponde un valor de dureza Vickers más alto. Los valores medios de dureza Vickers y demás parámetros obtenidos del ensayo de tracción se muestran en la Tabla 1.1. Estos valores están en el rango de la mayoría de las aleaciones de alto contenido de cobre y bronce con plomo-estaño. Cabe destacar que las aleaciones con 5% de Mg tienen valores de dureza Vickers muy alta y el uso de estos materiales para cojinetes requiere de un proceso de laminación el cual no es posible por la presencia de una fase frágil [31,15].

**Tabla 1.1 Valores de dureza Vickers. (HV) dureza Vickers, ( $\sigma_{0.2}$ ) esfuerzo 0.2, ( $\sigma_{max}$ ) Esfuerzo máximo, ( $\epsilon_{hom}$ ) Deformación homogénea, ( $\epsilon_{max}$ ) Deformación máxima.**

| Aleación   | Dureza Vickers [MPa] | Esfuerzo 0.2 ( $\sigma_{0.2}$ ) | Esfuerzo máximo ( $\sigma_{max}$ ) | Deformación homogénea ( $\epsilon_{hom}$ ) | Deformación máxima ( $\epsilon_{max}$ ) |
|------------|----------------------|---------------------------------|------------------------------------|--|---|
| Cu-1Mg-1Sn | 689±72               | 69.7±11                         | 194.3±38                           | 14.08±7                                    | 14.44±7                                 |
| Cu-1Mg-5Sn | 911±162              | 112.4±13                        | 208.3±4                            | 4.06±0.3                                   | 4.18±0.4                                |
| Cu-5Mg-1Sn | 2239±207             | --                              | --                                 | --   | --                                      |
| Cu-5Mg-5Sn | 2277±308             | --                              | --                                 | --   | --                                      |

## Capítulo 2. Antecedentes

### 2.1 Tribología

La palabra tribología se deriva del griego “τριβος” (tribos) que significa frotar [20]. La tribología es la ciencia y tecnología que estudia los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación de dos superficies en movimiento relativo. Es el puente que interrelaciona diferentes ramas de la ciencia como la química, la mecánica, la física entre otras [16]. Algunas de estas disciplinas son las siguientes:

- **Mecánica de sólidos:** Se orienta al análisis de los esfuerzos de contacto y en las temperaturas de la superficie debido al deslizamiento. Los investigadores con este énfasis publican modelos detallados de fricción y de desgaste en una selección de dispositivos mecánicos que se basan en simples mecanismos tribológicos.
- **Mecánica de fluidos:** Se orienta al análisis del comportamiento del lubricante líquido para diversas formas de superficies de deslizamiento. El trabajo en esta área es muy avanzado debido a que se requieren modelar la superficie de deslizamiento para los casos de películas gruesas en relación con la rugosidad de las superficies. Algunos trabajos también se han desarrollado en la influencia de la temperatura, rugosidad de la superficie sólida, y la reología del fluido en el espesor de la película de fluido y pérdidas por viscosidad.
- **Ciencia de materiales:** Se centra en los mecanismos atómicos y microestructurales por los cuales las superficies sólidas sufren degradación o alteraciones durante el deslizamiento. El trabajo en esta área se presenta generalmente en forma de micrografías, así como en la aplicación de técnicas de difracción de rayos x, microscopía de fuerza atómica en superficies sometidas a procesos de desgaste.

- Química: Se orienta al análisis de la reactividad entre los lubricantes y las superficies sólidas. El trabajo en este campo avanza en gran parte por la alteración química de los lubricantes en ensayos de desgaste [17, 4].

Las aleaciones tribológicas deben cumplir con ciertos requerimientos para así dar lugar a un mejor desempeño en el sistema mecánico, por lo que se pueden mencionar las siguientes.

- Conformabilidad: Esta propiedad proporciona al material de lograr una deformación plástica en la superficie para ayudar a compensar la falta de alineación y otros errores geométricos.
- Compatibilidad: El material del cojinete debe evitar ser soldado localmente con el eje bajo condiciones de altos esfuerzos, alta deformación y altas temperaturas en áreas localizadas [2].
- Incrustabilidad: Es la capacidad del material para absorber partículas ajenas al sistema y así evitar que el material de la flecha se llegue a rayar.
- Resistencia a la corrosión: Esta condición se puede minimizar mediante la selección de aceites y así inhibir la oxidación [2].
- Resistencia a la compresión y la fatiga: Capacidad para soportar una alta presión hidrodinámica y resistir la fractura con carga cíclica [12].
- Conductividad térmica: para aplicaciones en cojinetes es necesaria una alta conductividad térmica para obtener un buen desempeño. La fricción es disipada en forma de calor y una rápida transferencia de calor reduce la temperatura de operación por el contacto deslizante.
- Expansión térmica: El coeficiente de expansión térmica es una propiedad importante en el diseño del cojinete. Es deseable que la expansión térmica del cojinete sea mayor que la del eje de acero [14].

### 2.1.1 Desgaste

El desgaste se ha reconocido como el fenómeno de la eliminación de material de una superficie debido a la interacción con una superficie de acoplamiento [18], ya sea por deslizamiento, rodamiento o impacto. Casi todos los equipos pierden su fiabilidad debido al desgaste. El desgaste es el resultado de la eliminación de material por separación física debido a la microfractura, por disolución química o por fusión en la superficie de contacto. Existen diferentes mecanismos de desgaste: adhesivo, abrasivo, fatiga y por corrosión [18].

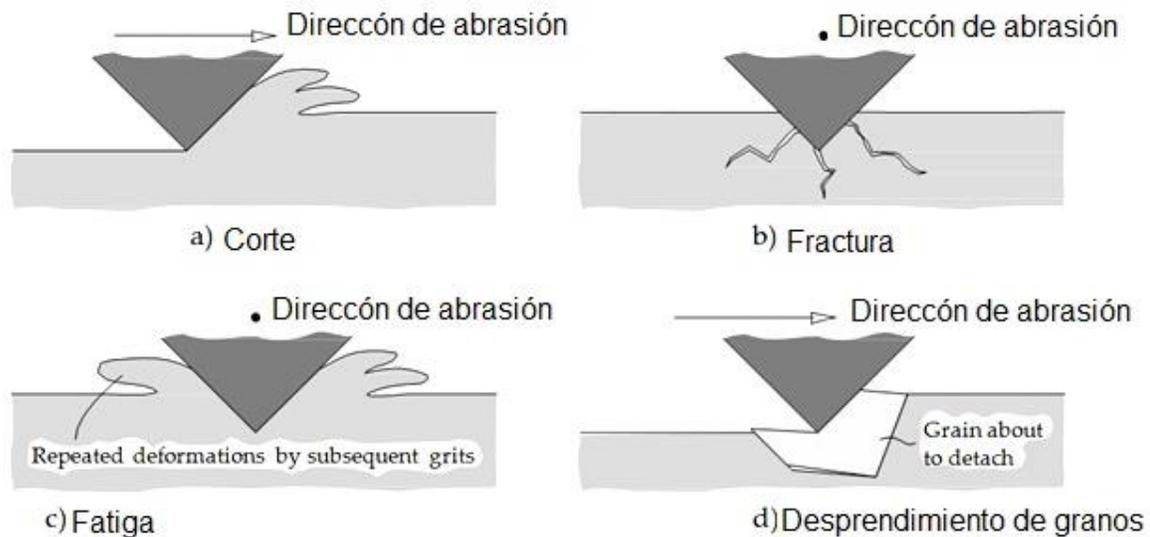
Desgaste adhesivo: El desgaste adhesivo está invariablemente asociado con la formación de uniones adhesivas en la superficie. Para que una unión adhesiva se forme, las superficies que interactúan deben estar en contacto. La fuerza de estos enlaces depende en gran medida de la naturaleza físico-química de las superficies de contacto. Los pasos para identificar el desgaste adhesivo son los siguientes:

- La deformación de las asperezas de contacto.
- La eliminación de las capas exteriores de la superficie.
- Formación de la unión adhesiva.
- La insuficiencia de las uniones y de transferencia de material.
- La modificación de los fragmentos transferidos.
- La eliminación de los fragmentos transferidos y la creación de partículas de desgaste sueltos [9].

Desgaste abrasivo: Como lo define la norma ASTM es debido a partículas duras o protuberancias duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de otra superficie sólida [19]. En el caso del desgaste abrasivo se tiene una estrecha relación entre las propiedades del material y su resistencia al desgaste [4]. Dentro del desgaste abrasivo existen diversos mecanismos de los cuales se hablara a continuación.

- Microcorte
- Fractura
- Fatiga
- Retiración de granos

El primer mecanismo se ilustra en la figura 2.1a, corte, representa el modelo clásico en el que un grano afilado o aspereza dura corta la superficie más suave. El material que se corta se retira como partículas de desgaste. Cuando el material es frágil, se puede producir fractura de la superficie desgastada (Figura 2.1b). En este caso las partículas de desgaste es el resultado de la convergencia de la grieta. Cuando un material dúctil se desgasta por un grano de corte de menor filo entonces la superficie desgastada se deforma repetidamente (Figura 2.1c). En este caso las partículas de desgaste son el resultado de la deformación plástica cíclica acumulada del metal. El mecanismo que se ilustra en la Figura 2.1d representa el desprendimiento de granos u hojuelas retiradas. Este mecanismo se aplica principalmente a la cerámica, donde los límites entre los granos son relativamente débiles. En este mecanismo el grano entero se pierde en forma de partículas de desgaste.



**Figura 2.1 Los mecanismos de desgaste por abrasión: microcorte, fractura, fatiga y retiro de grano [8].**

Desgaste por corrosión: Está definido como la degradación del material en la que están implicados ambos mecanismos de corrosión y desgaste [32]. Desgaste por corrosión tiene lugar cuando en primer instancia se produce una capa de óxido sobre el material, la cual posteriormente se desprende por la acción abrasiva [20].

Desgaste por fatiga: Se presenta debido a esfuerzos cortantes bajo la superficie del material, los cuales provocan la generación y el crecimiento de grietas que llegan hasta la superficie del mismo provocando el desprendimiento de una cantidad de material [4].

### 2.1.2 Fricción

La fricción es la resistencia al deslizamiento de un cuerpo sobre o a lo largo de otros [21,4] si bien la fricción es catalogada como un método de pérdida de energía y en muchos casos es indeseable, se tiene que considerar que una alta fricción es deseable entre neumáticos-carreteras, discos de freno-balatas. Sin embargo, para el estudio que se llevó a cabo en este trabajo una baja fricción es deseable en dispositivos mecánicos

como motores de combustión interna que pueden ser entre piezas como cigüeñal-cojinete, árbol de levas-cojinete, por mencionar solo algunos ejemplos.

La fricción ha sido un tema de gran interés desde el siglo XVI, cuando el famoso ingeniero y artista Leonardo da Vinci postuló en 1508 sobre el concepto de un coeficiente característico de proporcionalidad entre la fuerza de fricción y la carga normal [2].

Las leyes de fricción se formularon cuantitativamente por el ingeniero francés Guillaume Amontons en 1699 y son conocidas bajo su propio nombre. Las leyes que formuló son las siguientes:

La primera ley de Amontons' afirma que *la fuerza de fricción  $F$  entre dos superficies es proporcional a la carga normal aplicada  $N$ .*

La segunda ley de Amontons' afirma que *la fuerza de fricción  $F$  entre dos cuerpos sólidos es independiente del área aparente de contacto entre ellos.* [22]. La formulación de estas leyes expresan en términos generales lo siguiente:

- La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal aplicada
- La fuerza de fricción es independiente del área de contacto
- La fricción estática es mayor que la fricción dinámica
- La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento

En donde los dos últimos términos fueron propuestos por Coulomb.

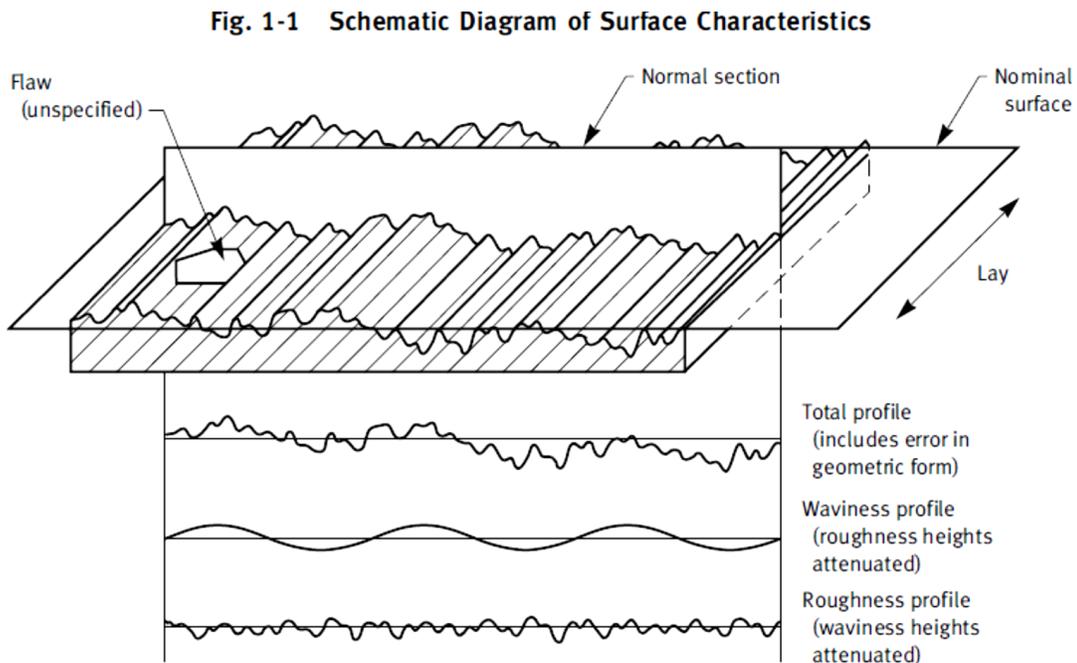
La fuerza de fricción se representa con el coeficiente de fricción bajo el símbolo  $\mu$ . Es la relación entre la carga de rozamiento  $F$  y la carga normal  $N$ , como lo muestra la ecuación 2.1 [23].

$$\mu = \frac{F}{N} \qquad 2.1$$

### 2.1.3 Lubricación

El objetivo principal de la lubricación es reducir la severidad tanto de los esfuerzos normales y de corte en contacto con la superficie sólida. Un hecho universal en las teorías de la fricción y el desgaste es que sólo una pequeña fracción del área nominal de contacto entre dos cuerpos está en contacto real. El área de contacto real puede ser tan poco como 0.01% de la superficie aparente de contacto, y no existen esfuerzos entre las superficies [17].

### 2.2 Textura de la superficie



**Figura 2.2 Diagrama esquemático de las características de la superficie [24].**

Para la mayoría de aplicaciones de ingeniería de superficie, es importante ser capaz de cuantificar la forma física de la superficie. En las operaciones de conformado de metales, con la rugosidad entre la herramienta y el metal se va a determinar el

comportamiento de la fricción y el desgaste y esto influirá en la eficacia de la lubricación [25].

En la industria manufacturera es muy importante conocer la rugosidad con la que se entregan las piezas antes de realizar ensambles, esto debido a las tolerancias con las que son fabricadas y así evitar que dichas dañen a otras. Actualmente con las máquinas de control numérico es muy fácil controlar estos parámetros. Comúnmente los perfiles de rugosidad son adoptados por geometrías que dejan a su paso un buril o un cortador.

La microscopía confocal cromática es una técnica de medición que comprende una sonda confocal cromática y un sistema de barrido lateral. La sonda confocal cromática detecta cada punto de la superficie de la pieza y, a su vez extrae su altura (topografía) y la intensidad de la luz asociada. Con lo anterior se hace un filtro con la transformada de Fourier y se obtienen los valores asociados a la superficie.

Perfil de rugosidad: El perfil modificado obtenido mediante la filtración para atenuar las longitudes de onda espaciales más largas asociadas con la ondulación.

Perfil de ondulación: El perfil modificado obtenido mediante la filtración para atenuar las longitudes de onda espaciales más cortas asociadas a la rugosidad y a las longitudes de onda espaciales más largas que asocian a la forma de la pieza [24].

La altura máxima ( $R_{max}$ ) es la distancia entre el valle más bajo hasta el pico con mayor altura dentro de la longitud de medición  $l$  como se puede observar en la figura [26].

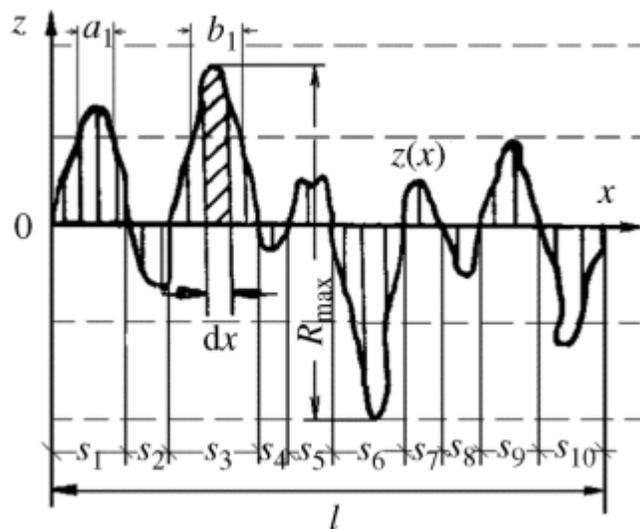
Rugosidad promedio ( $R_a$ ): Es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones de altura del perfil grabadas dentro de la longitud de evaluación y medida a partir de la línea media definida por la ecuación (2.2). Donde  $Z(x)$  es función de la altura;  $L$  es la longitud de medición horizontal;  $Z$  es la altura.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad 2.2$$

Rugosidad  $R_{q, rms}$  (root mean square): Analíticamente viene de la ecuación (2.3) dada a continuación.

$$R_{q, rms} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [Z(x)]^2 dx} \quad 2.3$$

Estos parámetros son los más utilizados en el estudio de ingeniería de superficies mediante los cuales se puede medir la evolución de la rugosidad conforme incrementa el número de ciclos de un ensayo. La bibliografía asegura que un valor de rugosidad crítica se asocia con un exceso de partículas ajenas al sistema tribológico al rayado de la superficie [25].



### 2.3 Perfilometría

Los parámetros antes descritos se obtienen mediante una técnica llamada perfilometría óptica la cual proporciona una imagen de la huella de desgaste que se compila mediante el recorrido de un láser sobre la huella de desgaste [27].

### 2.3.1 Tipos de Perfilómetros

En el mercado existen una gran cantidad de perfilómetros y existen de varios tipos que pueden ser de contacto y ópticos, además de que existe el microscopio de fuerza atómica, que es un equipo que se podría considerar de contacto, pero es ultra fino.

Un perfilómetro de superficie (también conocido como perfilómetro stylus) es un instrumento utilizado para analizar la textura superficial ya que mide el perfil de una muestra para proporcionar una imagen topográfica de su superficie; esto permite al usuario determinar la rugosidad de la muestra [39].

### 2.3.2 Perfilómetro óptico

El perfilómetro que se utilizó en el laboratorio para este trabajo funciona mediante la técnica de cromatismo axial que utiliza una fuente de luz blanca, donde la luz pasa a través de un lente de objetivo con un alto grado de aberración cromática. El índice de refracción del objetivo varía en relación con la longitud de onda de la luz, cada longitud de onda separada de la luz blanca incidente vuelve a enfocar a una distancia diferente de la lente (diferentes alturas). Cuando la muestra se mide dentro de la gama de posibles alturas, un solo punto monocromático se focaliza para formar la imagen. Debido a la configuración del sistema confocal, sólo la longitud de onda centrada pasará a través del filtro espacial con una alta eficiencia. El análisis espectral se lleva a cabo utilizando una rejilla de difracción. Esta técnica desvía cada longitud de onda en una posición diferente, interceptando una línea del sensor CCD (charge-coupled device), que a su vez indica la posición de la intensidad máxima y permite correspondencia directa con la posición de altura Z [33, 34, 35].

La figura 2.3 muestra la configuración clásica de un microscopio confocal punto. El camino óptico de la fuente de luz a la superficie de la muestra es la misma longitud que la trayectoria de la superficie de la pieza al detector [29].

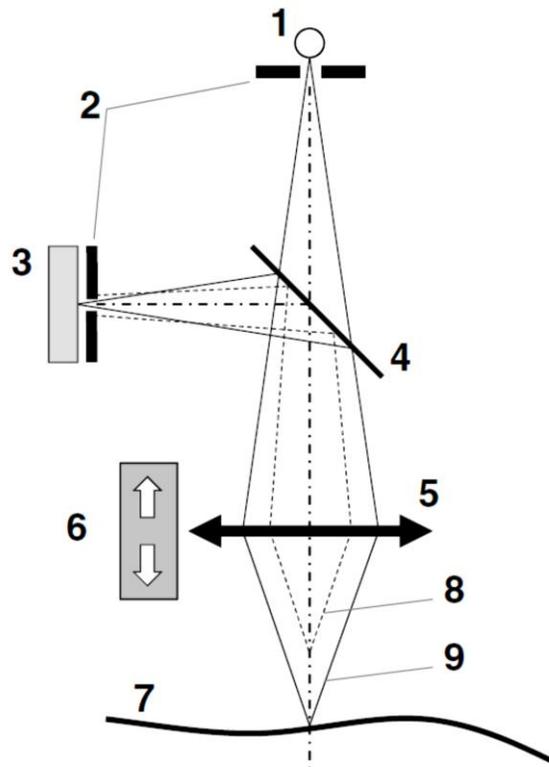


Figura 2.3 Configuración confocal clásica [29].

Cuando el punto focal está por encima o por debajo de la superficie (8), o en otras palabras, cuando la sonda está fuera de foco, la luz reflejada no pasa a través del agujero de alfiler del detector y la intensidad detectada es cercana a cero. Cuando el punto focal se encuentra exactamente en la superficie (9), es decir, cuando la sonda se enfoca en la superficie, la luz reflejada se centra de nuevo en el detector y pasa a través del agujero de alfiler, por lo tanto, conduce a un pico de intensidad en la foto-detector.

### 2.3.3 Sondas ópticas

Las sondas confocales cromáticas se pueden utilizar para la medición de área de textura de la superficie. En algunas configuraciones de área, la sonda se mueve en el eje X y la pieza de trabajo se mueve en el eje Y. En otras configuraciones, la sonda se fija y la pieza de trabajo se mueve en los ejes X y Y.

El escaneo superficial puede ser bidireccional, con una línea escaneada en un sentido y la siguiente en la dirección opuesta, por lo que la exploración es más rápida porque la sonda no tiene que volver al principio de cada línea antes de escanear.



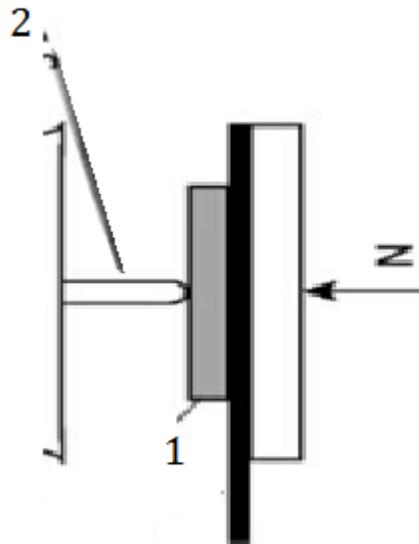
Figura 2.4 Ejemplos de plumas ópticas [29].

## 2.4 Tribómetro coaxial

Un tribómetro es una máquina empleado para realizar pruebas y simulaciones de desgaste, fricción y lubricación siendo estas objeto de estudio de la tribología.

Los ensayos tribológicos fueron realizados en un tribómetro coaxial construido en la UDIATEM por Lara Paredes [30], el tribómetro coaxial tiene como finalidad evaluar las características de la tribocapa que se forman en los materiales que son sometidos a contacto con movimiento relativo.

El modelo diseñado por Lara Paredes que se muestra en la figura 2.5, emplea un indentador de punta esférica que es presionado mediante una placa que se usa como muestra con una fuerza  $N$ . Se aplica una fuerza al perno que genera un movimiento rotacional [30]. El tribómetro coaxial fue diseñado por científicos rusos del Instituto de Ciencias de Materiales Avanzados y presentado en su artículo Reduction of friction coefficient of ultrafine-grained CP titanium en donde muestran la configuración del equipo [38].



**Figura 2.5 Configuración del tribómetro coaxial. (1) Placa usada como muestra, (2) Perno de punta esférica y (N) fuerza normal aplicada sobre la muestra para lograr huella de desgaste.**

## 2.5 Modelado del experimento

El coeficiente de fricción se obtiene de relacionar la fuerza normal aplicada por el perno sobre la probeta, y la geometría del mismo perno. Para el caso de la indentación se parte del esfuerzo promedio que se genera por la semiesfera del perno con la siguiente expresión.

$$\sigma = \frac{N}{\pi a^2} \quad 2.4$$

Siendo que  $N$  es la fuerza normal aplicada y  $a$  es el radio de la huella de contacto generada por el perno, donde  $a$  por el tipo de geometría se obtiene de analizar el modelo de dureza Brinell ( $HB$ ). La  $HB$  mide la resistencia de un material a ser penetrado con un indentador de punta esférica, la  $HB$  se obtiene de la siguiente ecuación.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad 2.5$$

Donde  $HB$  es la dureza Brinell expresada en unidades de masa sobre área,  $D$  es el diámetro de curvatura del perno,  $P$  la carga en Kilogramos y  $d$  es el diámetro de la huella de indentación, despejando  $d$  se obtiene:

$$d = \sqrt{D^2 - \left(D - \frac{2P}{HB\pi D}\right)^2} \quad 2.6$$

De la relación  $2a = d$  se obtiene lo siguiente:

$$a = \frac{\sqrt{D^2 - \left(D - \frac{2P}{HB\pi D}\right)^2}}{2} \quad 2.7$$

Llevando a cabo un análisis de fuerzas se tiene que el par generado viene de la siguiente integral

$$\int_A r df \quad \mathbf{2.8}$$

Donde  $r$  es la variación del radio de contacto y  $df$  es la fuerza del par, mientras que  $df$  es función del coeficiente de fricción que se expresa de la siguiente manera:

$$df = \mu dN \quad \mathbf{2.9}$$

De la fuerza de contacto y del área se obtiene una nueva ecuación para  $\sigma$

$$\sigma = \frac{dN}{dA} \quad \mathbf{2.10}$$

Donde el elemento diferencial de área está dado por

$$dA = rd\theta dr \quad \mathbf{2.11}$$

Ahora sustituyendo y operando las ecuaciones anteriores en  $T$

$$T = \int_0^a \int_0^{2\pi} \mu \sigma r^2 d\theta dr \quad \mathbf{2.12}$$

$$T = \int_0^a \int_0^{2\pi} \mu \frac{N}{\mu a^2} r^2 d\theta dr \quad \mathbf{2.13}$$

Se obtiene lo siguiente

$$T = \frac{2\mu Na}{3} \quad \mathbf{2.14}$$

La ecuación de donde se obtiene la evolución del coeficiente de fricción  $\mu$  es la anterior solo se despeja  $\mu$  y se valúa para  $T$  y  $N$  [10,28].

$$\mu = \frac{3T}{2Na} \quad \mathbf{2.15}$$

## Capítulo 3. Experimentación

### 3.1 Ensayo tribológico

Para el desarrollo de este trabajo se caracterizaron las propiedades mecánicas y las microestructuras de cuatro aleaciones ensayadas mediante tribometría coaxial, para después obtener un coeficiente de fricción mediante los datos obtenidos durante dicho ensayo.

Para el ensayo tribológico se utilizaron las siguientes aleaciones del sistema Cu-Mg-Sn con las siguientes composiciones (en % peso) de Cu-1%Mg-1%Sn, Cu-1%Mg-5%Sn, Cu-5%Mg-1%Sn y Cu-5%Mg-5%Sn, cabe señalar que estas fueron las composiciones nominales que se eligieron para cada aleación, aunque también se contaba con un previo análisis por vía húmeda y las composiciones se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Composiciones del sistema Cu-Mg-Sn % en peso.

| Designación | Composición Nominal [wt%] |    |    | Vía Húmeda [wt%] |       |       |       |      |       |   |
|-------------|---------------------------|----|----|------------------|-------|-------|-------|------|-------|---|
|             | Cu                        | Mg | Sn | Cu               | Mg    | Sn    | Pb    | Fe   | Al    | V |
| Cu-1Mg-1Sn  | 98                        | 1  | 1  | 97.574           | 1.046 | 1.116 | 0.254 | 0.01 |       |   |
| Cu-5Mg-1Sn  | 94                        | 5  | 1  | 93.394           | 5.54  | 0.81  | 0.226 | 0.03 |       |   |
| Cu-5Sn-1Mg  | 94                        | 1  | 5  | 93.868           | 0.983 | 4.901 | 0.211 |      | 0.037 |   |
| Cu-5Mg-5Sn  | 90                        | 5  | 5  | 90.28            | 5.166 | 4.344 | 0.21  |      |       |   |

### 3.1.1 Material de contraparte tribológica

Para la contraparte tribológica se usaron pernos de una aleación AISI 9840 (Fe-0.4%C-0.25%Si-0.8%Mn-1%Ni-0.25%Mo, % en peso) que se maquinaron mediante equipo de control numérico con un radio de curvatura de 200 mm y un diámetro de 20 mm como se puede observar en la figura 3.1.

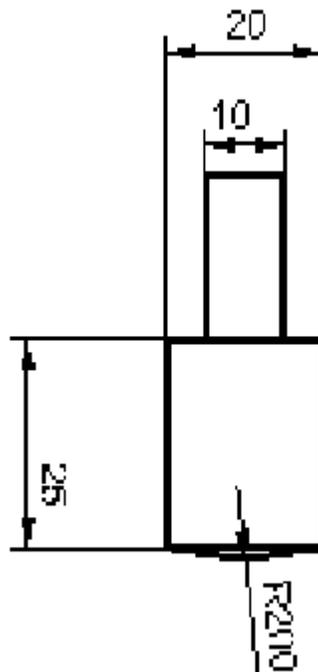


Figura 3.1 Geometría del perno en mm, Unigraphics NX7.5®

### 3.1.2 Preparación previa al ensayo tribológico de las probetas

La preparación que se le dio a cada una de las probetas fue un pulido con acabado espejo, la preparación se realizó con lijas de tamaño de malla de 240, 360, 400, 500, 600 de la marca Fandeli® para después utilizar lijas 800/1200 y 1200/2400 de la marca

Buehler® para finalmente pulir con paño de la misma marca y alúmina de 0.05µm, posteriormente se limpiaron con alcohol y aire caliente. Cabe señalar que para el perno se aplicó un procedimiento muy parecido previo a cada ensayo a realizar en donde el perno se pulió usando lijas de 600, 1200 y finalmente con paño Microcloth®. Todo lo anterior con la finalidad de remover el material adherido durante el ensayo y estandarizar el experimento.

### **3.1.3 Medición de rugosidad previa al ensayo tribológico**

Se obtuvieron los perfiles de rugosidad para cada una de las probetas que ya habían sido pulidas, por medio de un perfilómetro de la serie micro/macro de Nanovea cuyo funcionamiento se describe en la sección 2.3.2 y se puede constatar que aún teniendo un acabado espejo existe rugosidad, misma que es posible observar en una serie de imágenes del experimento que se muestran más adelante.

### **3.2 Realización del ensayo tribológico**

Los experimentos se realizaron en un tribómetro coaxial de velocidad y carga regulables [10] instrumentado con una celda de carga y un medidor de par Futek®, monitoreados mediante equipo comercial de adquisición de datos de la marca National instruments® mientras que la recolección de datos de velocidad angular del servomotor corrió a cargo de un controlador Arduino®, dicho dispositivo fue rediseñado y construido en el laboratorio por Lara Paredes [30]. A partir de ensayos de micro-dureza en las cuatro aleaciones se determinaron las condiciones a las que se someterían las probetas de material tribológico. En la tabla 3.2 se presentan las condiciones del diseño experimental.

**Tabla 3.2 Condiciones del diseño experimental primer ensayo.**

| Aleación   | $\omega$ [rpm] | $R_{\text{perno}}$ [mm] | F [N] | t [s] |
|------------|----------------|-------------------------|-------|-------|
| Cu-1Mg-1Sn | 50             | 200                     | 240   | 600   |
| Cu-5Mg-1Sn | 50             | 200                     | 240   | 600   |
| Cu-5Sn-1Mg | 50             | 200                     | 240   | 600   |
| Cu-5Mg-5Sn | 50             | 200                     | 240   | 600   |

**Tabla 3.2 Condiciones del diseño experimental segundo ensayo.**

| Aleación   | $\omega$ [rpm] | $R_{\text{perno}}$ [mm] | F [N] | t [s] |
|------------|----------------|-------------------------|-------|-------|
| Cu-1Mg-1Sn | 150            | 200                     | 240   | 600   |
| Cu-5Mg-1Sn | 150            | 200                     | 240   | 600   |
| Cu-5Sn-1Mg | 150            | 200                     | 240   | 600   |
| Cu-5Mg-5Sn | 150            | 200                     | 240   | 600   |

Para cada uno de los experimentos realizados se registraron y almacenaron datos de la fuerza normal aplicada, así como el par generado por el sistema de giro del motor. El control de los componentes se realizó por medio de la interfaz de programación de Labview 8.5<sup>®</sup> con una frecuencia de 100 Hz. La aplicación de la carga y giro corre a cargo de un actuador lineal para más detalles del funcionamiento y diseño del equipo puede consultarse en la referencia [30].

### **3.2.1 Caracterización del material ensayado mediante tribometría coaxial**

La caracterización de las probetas ensayadas consistió en la siguiente metodología

- Medición de masa
- Medición de rugosidad antes de la prueba de tribometría coaxial
- Ensayo de desgaste tribológico
- Medición de rugosidad después del ensayo
- Microscopia óptica y electrónica

### **3.2.2 Medición de masa de probetas**

Para cada probeta que se ensayó se realizó la medición de la masa antes y después para conocer si hubo pérdida o transferencia de material. Las mediciones se realizaron en una balanza con una precisión de 0.0001g.

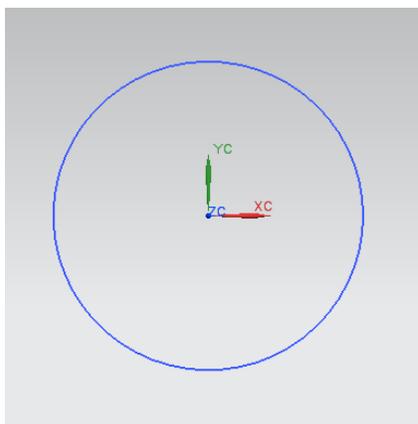
### **3.2.3 Medición de rugosidad posterior al ensayo tribológico**

Se obtuvieron nuevos perfiles de rugosidad para cada una de las probetas ensayadas, esto se realizó mediante perfilometría óptica con un perfilómetro de la serie micro photonics de Nanovea. Dicha técnica se aplicó a cada huella generada por el perno del tribómetro, se establecieron diferentes áreas a medir, pero siempre procurando medir toda la longitud de dicha huella.

### **3.2.4 Microscopia óptica y electrónica**

Para la parte de caracterización del desgaste de la superficie, la microestructura del material base y la tribocapa generada mediante el ensayo debido a una alta deformación plástica. Las muestras se analizaron mediante microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido [4, 28, 25].

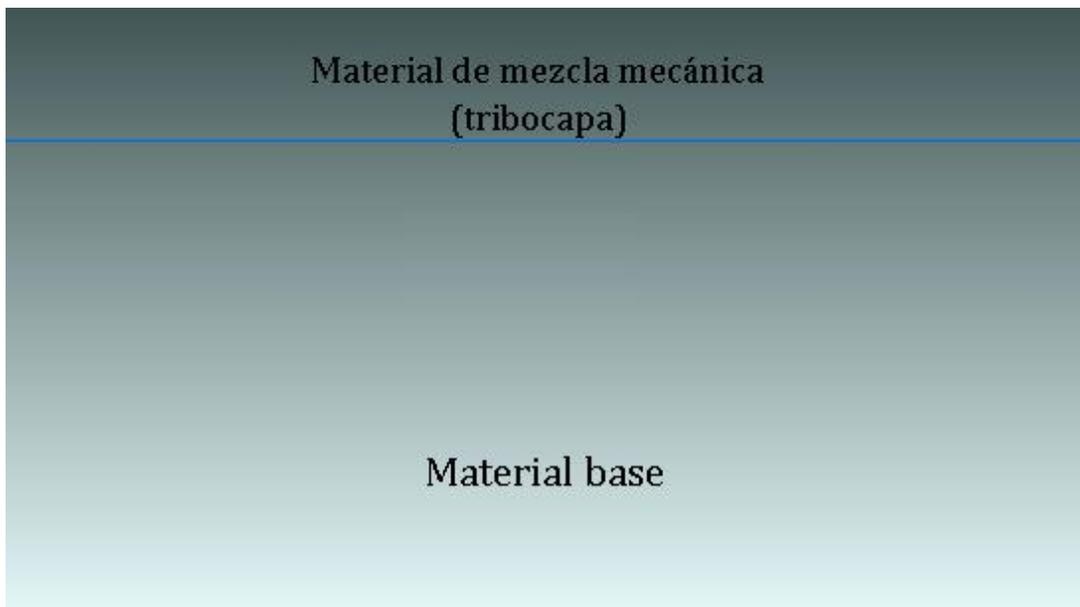
Las probetas fueron marcadas para poder asignarles un sistema de referencia como se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2 Sistema de coordenadas de probetas**

Las superficies de las probetas se observaron con un microscopio óptico Nikon con objetivos Olympus y cámara Carl Zeiss®, así como también con un microscopio electrónico de barrido Philips® XL20 equipado con un filamento de tungsteno. Este procedimiento se realizó para las cuatro aleaciones con el fin de observar y caracterizar cómo y qué mecanismos de desgaste se habían generado en la zona de la huella de desgaste generada por el perno siguiendo el esquema de la figura 3.2.

Después de caracterizar las superficies de las muestras se procedió a cortar las huellas de desgaste para observarlas de forma transversal y así poder caracterizar al material base de la tribocapa generada mediante el ensayo. Dicho corte se hizo con una cortadora de precisión procurando cortar la huella por mitad para poder garantizar que se encuentra en una zona visible a la tribocapa. Para este nuevo juego de probetas se llevó a cabo un montaje en resina epóxica de curado en frío con una preparación metalográfica usando lijas de malla 240, 360, 400, 500, 600 de la marca Fandeli® para después utilizar lijas 800/1200 y 1200/2400 de la marca Buehler® y finalmente con un paño. Posteriormente se les observó con microscopia electrónica de barrido a diferentes aumentos siguiendo el esquema de la figura 3.3. Dado que ya se había trabajado con este tipo de aleaciones también se consideró utilizar un ataque químico para poder observar la microestructura del material, esto se realizó con microscopia óptica en donde también se pueden observar muy buenas imágenes de la microestructura de fundición y la microestructura por deformación plástica.



**Figura 3.3 Esquema de la sección transversal**

## Capítulo 4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de cada uno de los ensayos y pruebas realizadas al material tribológico con la metodología que se describió en el capítulo anterior, que consistió en:

- Obtención de los perfiles de rugosidad de la probeta previa al ensayo.
- Ensayo tribológico.
- Medición de masa.
- Medición de la rugosidad después del ensayo.
- Obtención de micrografías mediante microscopía óptica y electrónica de barrido de las superficies y de la sección transversal.

### 4.1 Evaluación del material

Cabe destacar que se tomaron los perfiles de rugosidad y se obtuvieron micrografías en las probetas antes del ensayo para así poder conocer en primera instancia la microestructura del material y la rugosidad inicial como un estándar del diseño del experimento.

**Tabla 4.1 Valores de diámetros para cada probeta después del ensayo.**

| Muestra | Composición | X[mm]  | Y[mm]  |
|---------|-------------|--------|--------|
| 1       | Cu1Mg1Sn    | 3.5771 | 3.7677 |
| 2       | Cu1Mg1Sn    | 4.3970 | 4.7820 |
| 1       | Cu5Mg1Sn    | 4.0507 | 4.1138 |
| 2       | Cu5Mg1Sn    | 4.5867 | 4.9731 |
| 1       | Cu5Mg5Sn    | 4.8128 | 4.9144 |

|   |          |        |        |
|---|----------|--------|--------|
| 2 | Cu5Mg5Sn | 5.4467 | 5.8000 |
| 1 | Cu1Mg5Sn | 2.9808 | 2.8638 |
| 2 | Cu1Mg5Sn | 2.9167 | 2.9343 |

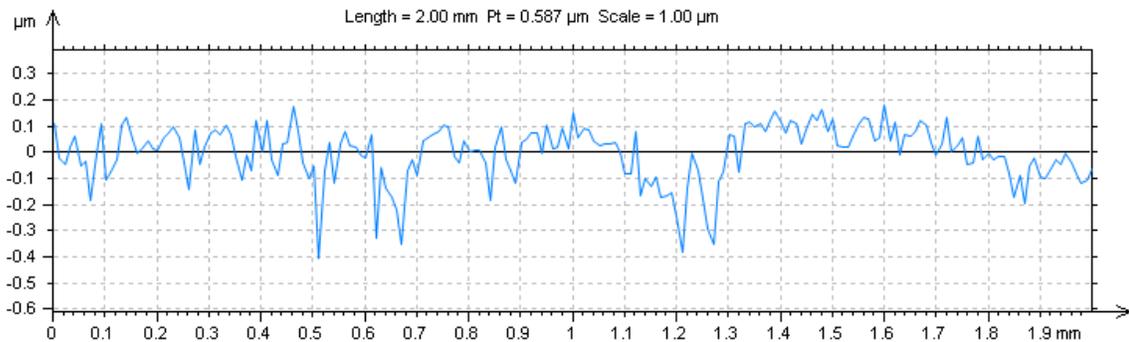
#### 4.1.1 Rugosidad

Para cada una de las probetas ensayadas con el tribómetro coaxial se obtuvieron los perfiles de rugosidad y como era de esperarse por la preparación metalográfica a la que se sometieron con un acabado espejo, y tomando como referencia la rugosidad promedio  $R_a$  está dentro de los valores 0.04-0.05  $\mu\text{m}$ .

| Muestra | Composición | $R_a[\mu\text{m}]$ Previa | $R_a[\mu\text{m}]$ Posterior |
|---------|-------------|---------------------------|------------------------------|
| 1       | Cu1Mg1Sn    | 0.0512                    | 4.53                         |
| 2       | Cu1Mg1Sn    | 0.0512                    | 3.79                         |
| 1       | Cu5Mg1Sn    | 0.0422                    | 3.9                          |
| 2       | Cu5Mg1Sn    | 0.0422                    | 1.65                         |
| 1       | Cu5Mg5Sn    | 0.0771                    | 2.32                         |
| 2       | Cu5Mg5Sn    | 0.0771                    | 7.94                         |
| 1       | Cu1Mg5Sn    | 0.206                     | 1.47                         |
| 2       | Cu1Mg5Sn    | 0.206                     | 1.28                         |

## 4.2 Evaluación del material Cu-1%Mg-1%Sn

Para la aleación Cu-1%Mg-1%Sn se realizó la metodología antes descrita iniciando por la obtención de los perfiles de rugosidad previa al ensayo tribológico para así obtener los parámetros de rugosidad máxima y promedio. Como se puede observar en las figuras 4.1 y 4.2 que corresponden a un perfil de rugosidad obtenido de una probeta Cu-1%Mg-1%Sn con acabado espejo, aun así es claro que teniendo este tipo de acabados existe una rugosidad de baja magnitud.



**Figura 4.1 Perfil de rugosidad de una probeta Cu-1%Mg-1%Sn. Mechanical 3D®.**

En la tabla 4.1 se muestran los valores de rugosidad promedio que se tomaron del mismo equipo que son calculadas mediante las ecuaciones 2.2 y 2.3.

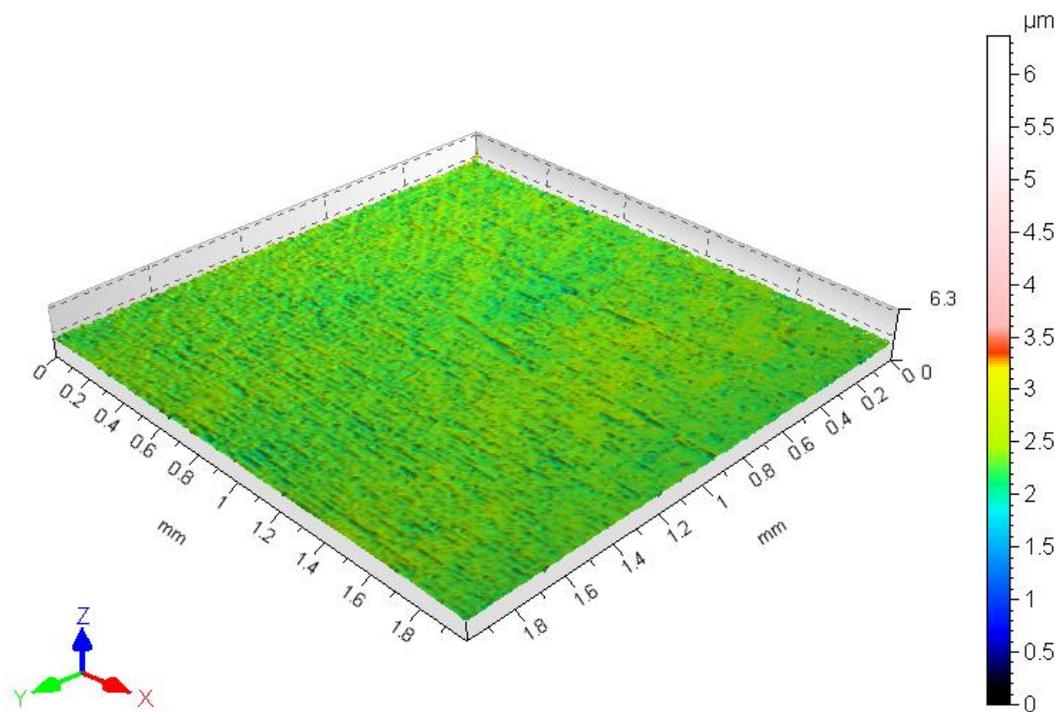


Figura 4.2 Perfil de material en 3D de una probeta Cu-1%Mg-1%Sn. Mechanical 3D®.

#### 4.2.1 Caracterización de microestructuras

Para la aleación con el sistema Cu-1Mg-1Sn se tiene una microestructura principalmente con una sola fase y existe un compuesto en menor proporción en las zonas interdendríticas como una mezcla eutéctica de Cu y  $\text{Cu}_2\text{Mg}$  esto es posible observarlo en la figura 4.3 [31].

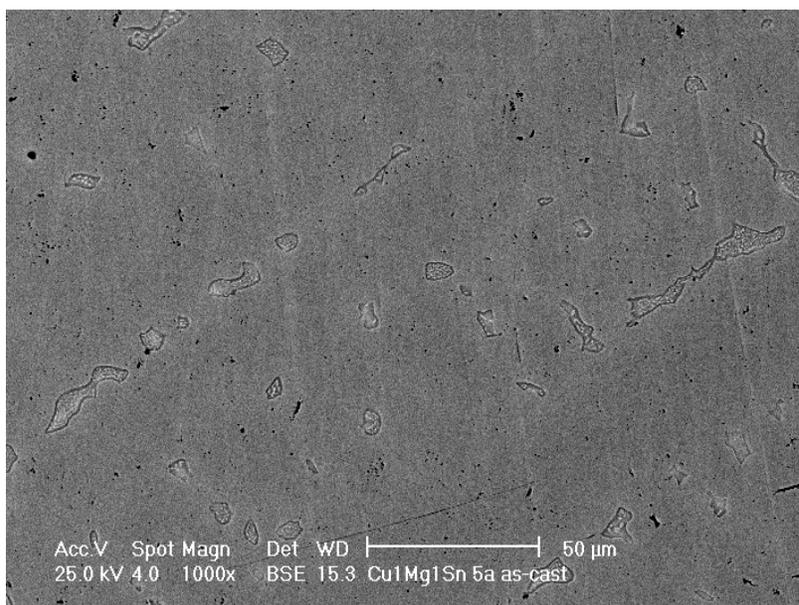


Figura 4.3 Microestructura de una muestra Cu1Mg1Sn.

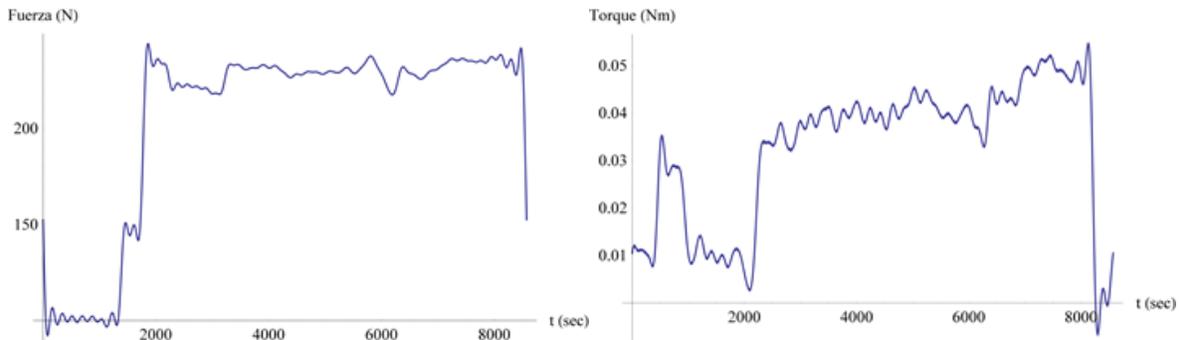
#### 4.2.2 Medición de masa

Con la finalidad de observar el comportamiento del material de manera cuantitativa se realizaron mediciones de masa antes y después del ensayo en cada probeta. A continuación en la tabla 4.2 se muestran los datos obtenidos.

Tabla 4.2 Valores de masa para cada probeta antes y después del ensayo.

| Muestra | Masa inicial [g] | Masa final [g] | Diferencia [g] |
|---------|------------------|----------------|----------------|
| 1       | 13.8501          | 13.8492        | 0.0009         |
| 2       | 13.8492          | 13.8481        | 0.0011         |

Una vez realizado el ensayo tribológico se extrajeron los datos muestreados por el equipo de captación de señales y en la figura 4.4a podemos observar lo que corresponde a curva de fuerza normal aplicada sobre la muestra con respecto al tiempo del ensayo, así mismo también se tiene la curva de torque medido por el torquímetro durante el ensayo figura 4.4b [30].

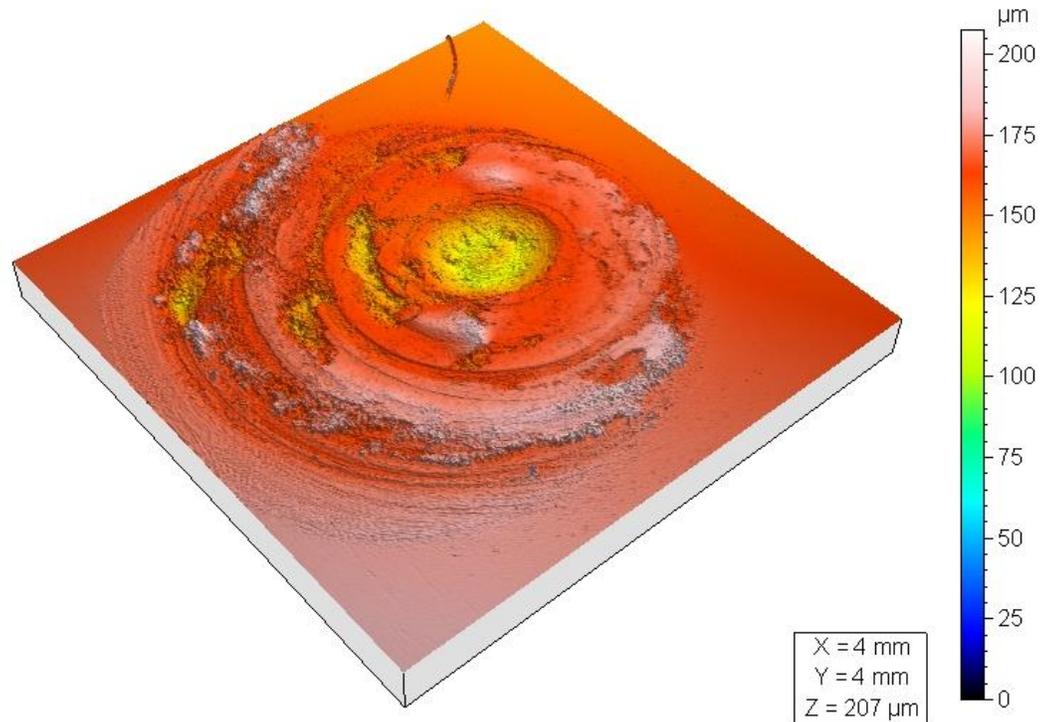


**Figura 4.4 Graficas de carga y torque filtrada, para el ensayo 1. Mathematica®.**

Cabe destacar que las curvas antes mencionadas en la figura 4.4 fueron originalmente captadas con ruido durante el ensayo, por lo que fue necesario realizar un filtrado de los datos, para así poder quedarnos solo con los datos que nos interesaban. El filtro usa el método la transformada de Fourier para pasar al dominio de la frecuencia a la señal para después multiplicarlo por la lista de transformados de Fourier, de esta forma solo se obtuvieron los datos con las frecuencias más bajas en el espectro, posteriormente se aplica la transformada inversa y solo se obtienen las señales de baja frecuencia.

### 4.2.3 Caracterización de las superficies

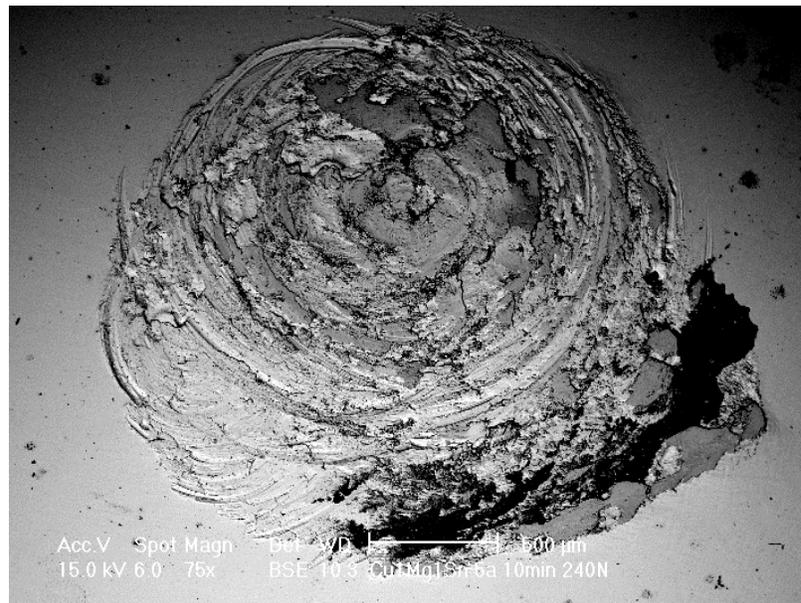
En las siguientes figuras se muestra la zona de deformación plástica generada por el perno del tribómetro sobre el material de estudio. Para esta sección el material presentado es la composición de Cu-1Mg-1Sn de un proceso de fundición que se llevó a cabo en laboratorios de la Facultad de Ingeniería sin ningún tratamiento térmico posterior.



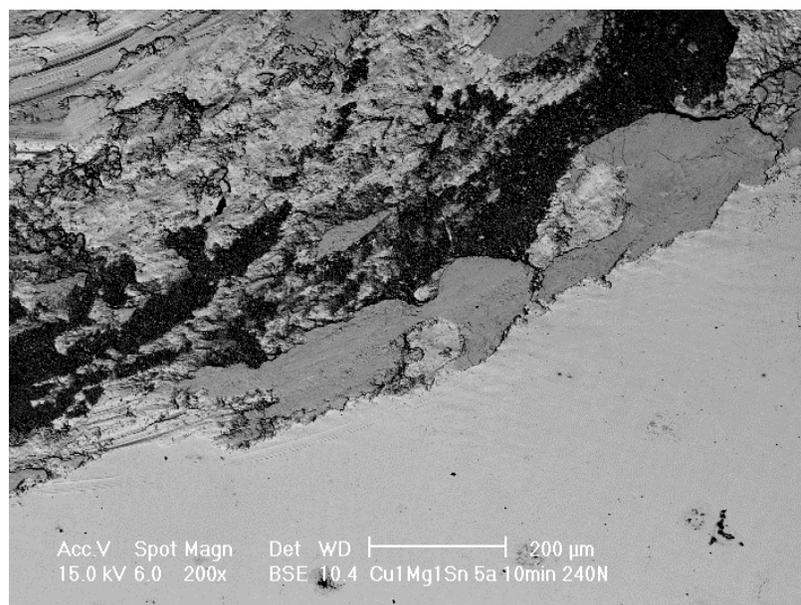
**Figura 4.5 Perfil de una huella de ensayo tribológico Cu-1Mg-1Sn (10 minutos). Mechanical 3D®.**

En la figura 4.5 se muestra el perfil de una huella de ensayo tribológico obtenida mediante perfilometría óptica en la que es posible ver el daño generado por el perno del tribómetro. Se pueden ver los desprendimientos de material debido a la abrasión entre ambos materiales, además de una excentricidad en la geometría de la huella.

En la figura 4.6 se puede apreciar una de las huellas obtenidas mediante electrones retrodispersados. En dicha figura es posible observar una combinación de dos mecanismos de desgaste como lo es el abrasivo y el adhesivo, sobre todo en esta huella en la parte inferior derecha se observa una zona oscura que es el polvo abrasivo depositado.

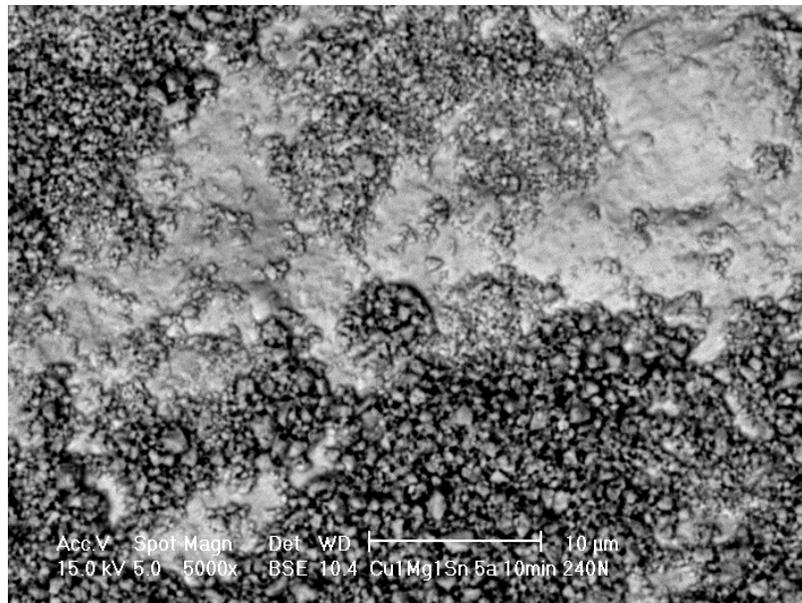


**Figura 4.6 Superficie de un material Cu-1Mg-1Sn ensayado tribológicamente.**



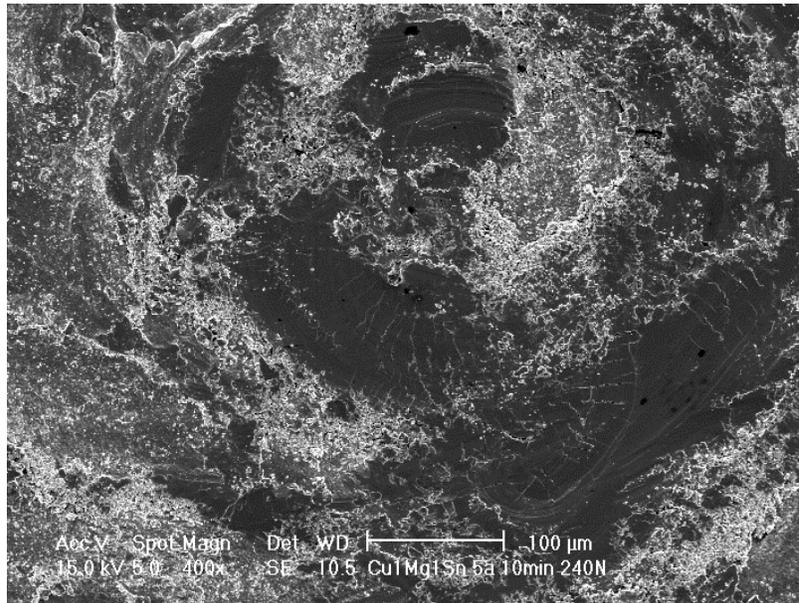
**Figura 4.7 Frontera entre el material de origen y la zona con polvo abrasivo acumulado.**

Conforme se observa la probeta a mayores aumentos podemos verificar que en efecto es polvo abradido producto de la misma aleación como se muestra en la figura 4.7 y 4.8



**Figura 4.8 Polvo desprendido de un material Cu-1Mg-1Sn**

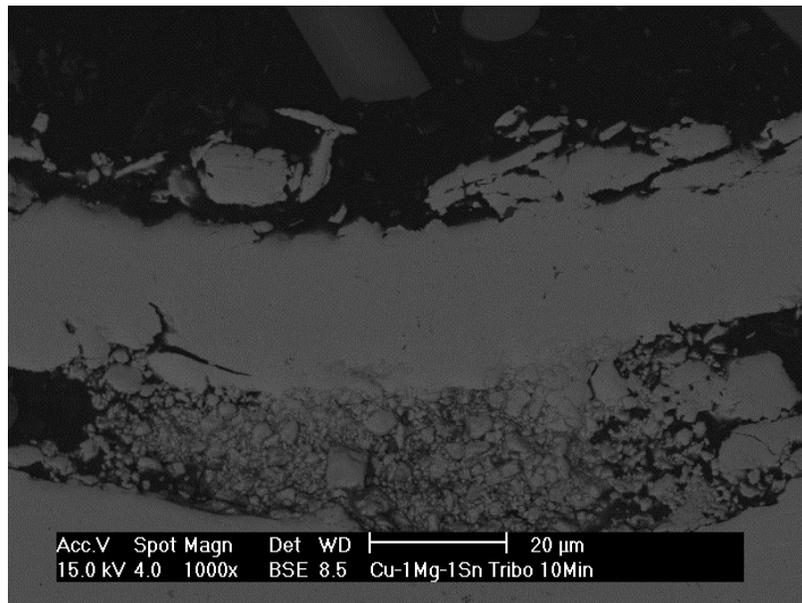
Como se mencionó al inicio, en la probeta se presentaron dos mecanismos de desgaste. El desgaste adhesivo se muestra en la figura 4.9 en donde es posible observar grietas que caracterizan a este tipo de mecanismo. En el centro de la probeta, se muestra un área de dicho mecanismo de desgaste generado por el perno, cabe señalar que por la geometría del perno, el centro es el área de contacto permanente.



**Figura 4.9** Probeta presenta grietas características de desgaste adhesivo.

#### **4.2.4 Evolución de microestructuras**

En la siguientes figuras se muestra como por el ensayo tribológico se crea una deposición de una capa de material ya desprendida, así como polvo que quedó atrapado entre ambas capas de material deformado, mismo que se ve al centro de la imagen.



**Figura 4.11 Capa depositada**

A mayores aumentos se puede corroborar de qué se trata de polvo abrasivo producto de la misma aleación atrapado entre el material y la capa depositada como se muestra en la figura 4.11.

#### **4.2.5 Curvas de fricción**

Como parte del trabajo, se realizaron las curvas de fricción con los datos obtenidos por el tribómetro y utilizando la ecuación de la sección 2.5. Esto con la finalidad de conocer el comportamiento del material que se sometió a desgaste y poder observar la evolución del coeficiente de fricción en el tiempo, figura 4.12.

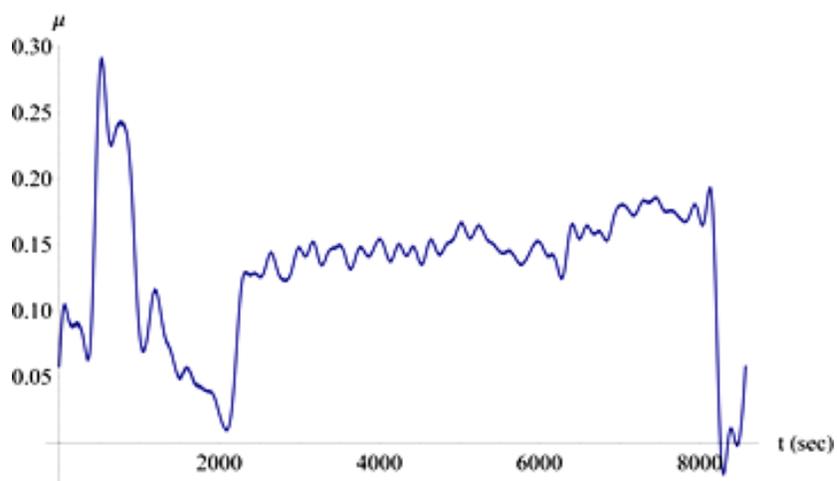


Figura 4.12 Evolución del coeficiente de fricción en aleación Cu-1Mg-1Sn

### 4.3 Evaluación del material Cu-5%Mg-1%Sn

Para la evaluación del sistema Cu-5%Mg-1%Sn se realizó un estudio metalográfico para lograr un acabado espejo y posteriormente obtener los perfiles de rugosidad máxima y promedio previas al ensayo tribológico. Los perfiles medidos mediante perfilometría óptica se pueden observar en las figuras 4.14 y 4.15.

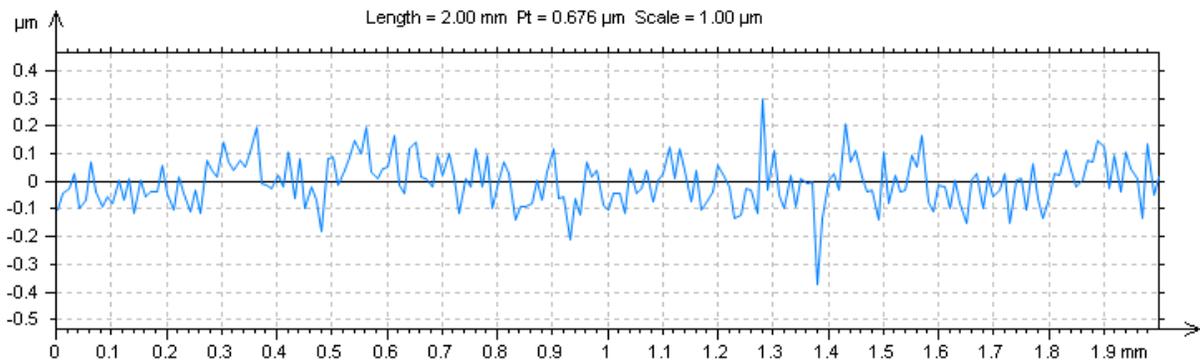


Figura 4.14 Perfil de rugosidad de una probeta Cu-5%Mg-1%Sn. Mechanical 3D®.



Figura 4.15 Perfil de material en 3D de una probeta Cu-5%Mg-1%Sn. Mechanical 3D®.

En la tabla 4.3 se pueden apreciar los valores obtenidos de rugosidad obtenidos a partir de perfilometría óptica los cuales son calculados con las ecuaciones 2.2 y 2.3

#### 4.3.1 Caracterización de microestructuras de Cu-5%Mg-1%Sn

Una mezcla homogénea de Cu + Cu<sub>2</sub>Mg se encontró en las regiones interdendríticas de las composiciones de Cu-5Mg-1Sn. Una micrografía óptica se muestra en la Figura 4.16, que revela la microestructura dendrítica [31].

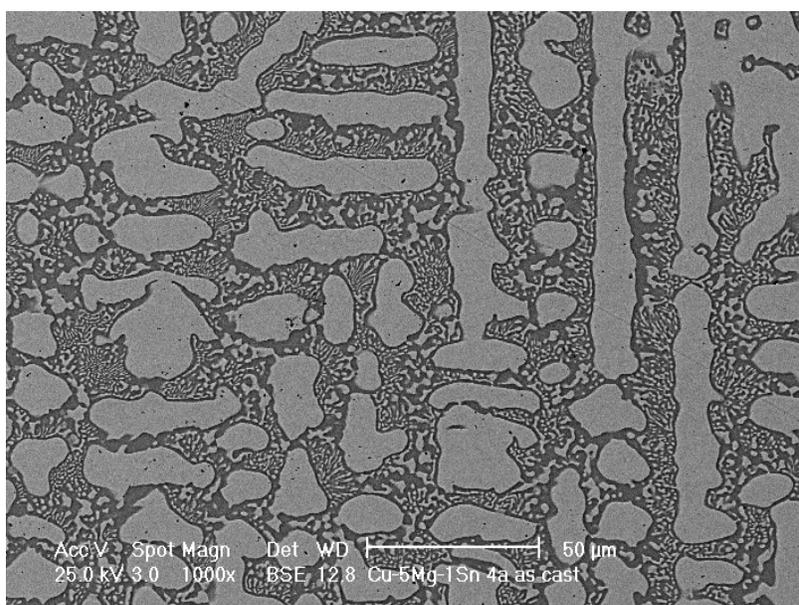


Figura 4.16 microestructura de una aleación Cu5Mg1Sn

#### 4.3.2 Medición de masa

Tabla 4.4 Valores de masa para cada probeta antes y después del ensayo.

| Muestra | Masa inicial [g] | Masa final [g] | Diferencia [g] |
|---------|------------------|----------------|----------------|
| 1       | 9.7309           | 9.7294         | 0.0015         |
| 2       | 9.7294           | 9.7274         | 0.0020         |

### 4.3.3 Ensayo tribológico

Para las probetas del sistema Cu-5%Mg-1%Sn se obtuvieron los datos muestreados por el equipo para después graficar sus respectivas curvas con los datos ya filtrados mediante la Transformada de Fourier y en la figura 4.17a podemos observar la gráfica que corresponde a la fuerza normal que aplica el perno sobre la muestra, de manera constante en el tiempo con muy pocas variaciones. De la misma forma en la figura 4.17b se muestra el par medido durante el ensayo.

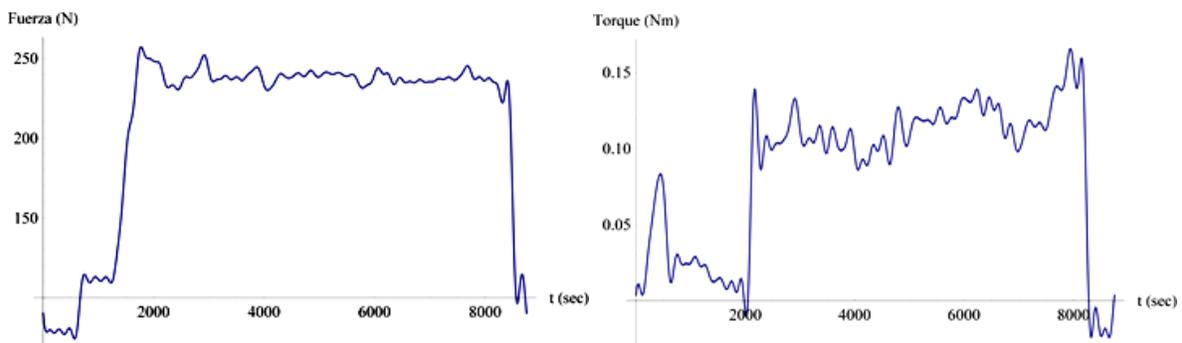
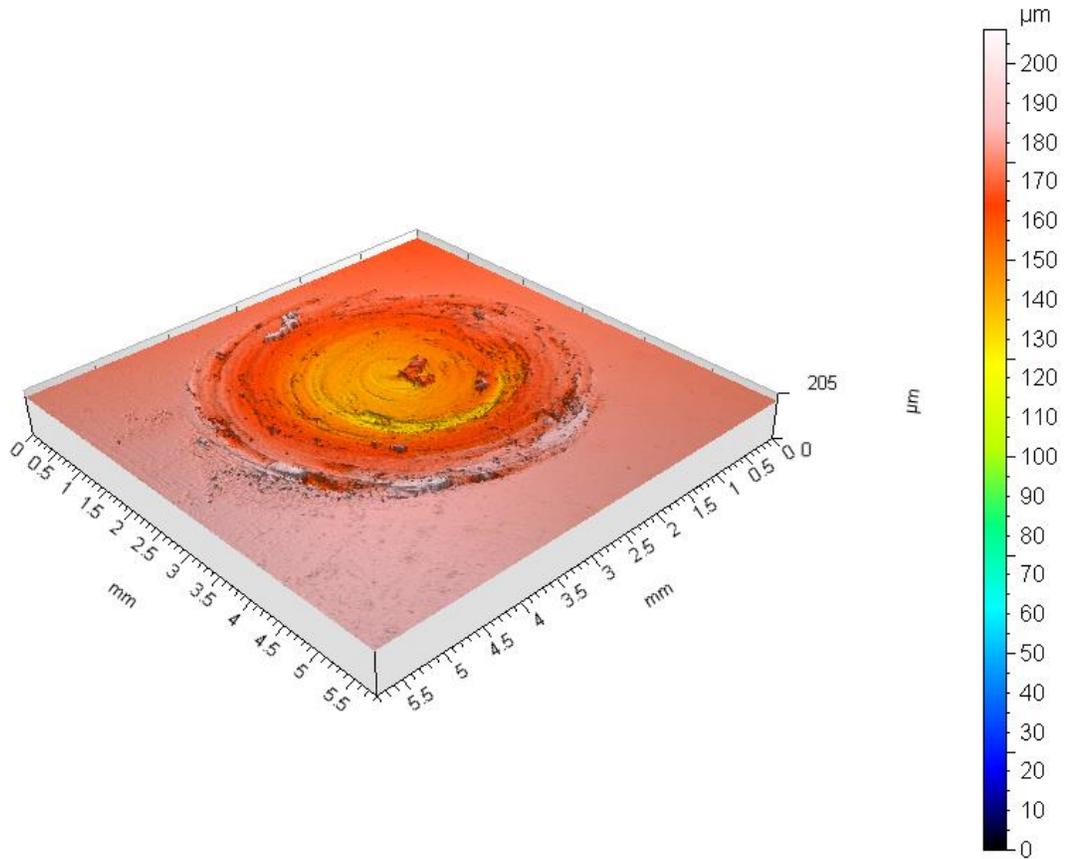


Figura 4.17 Graficas de carga y torque filtrada, para el ensayo 1, Cu-5%Mg-1%Sn (10 minutos). Mathematica®.

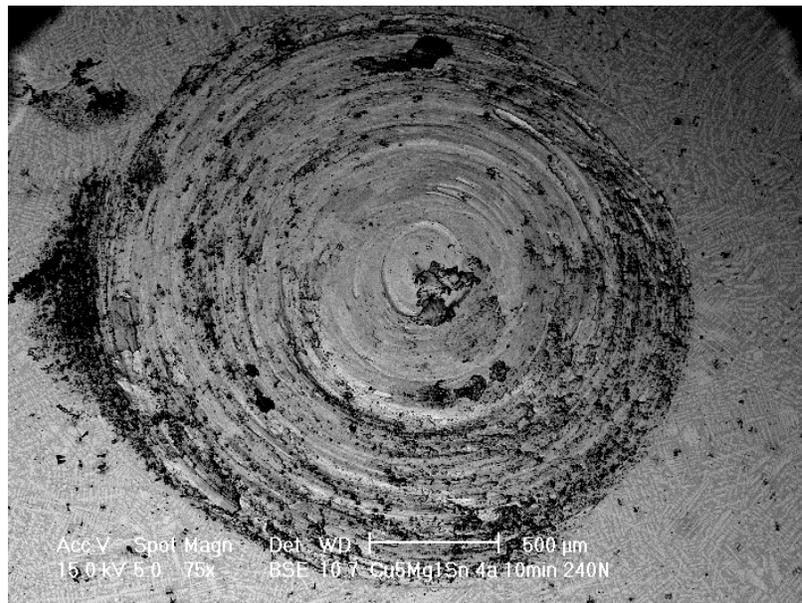
### 4.3.4 Caracterización de superficies Cu-5%Mg-1%Sn

En las siguientes figuras se muestran las zonas más representativas en lo que respecta a la zona de deformación plástica generada por el perno en la probeta la figura 4.18 fue obtenida mediante perfilometría óptica, para esta probeta se optó por mostrar la zona completa de la huella en la probeta y posteriormente obtener valores de rugosidad en la superficie.



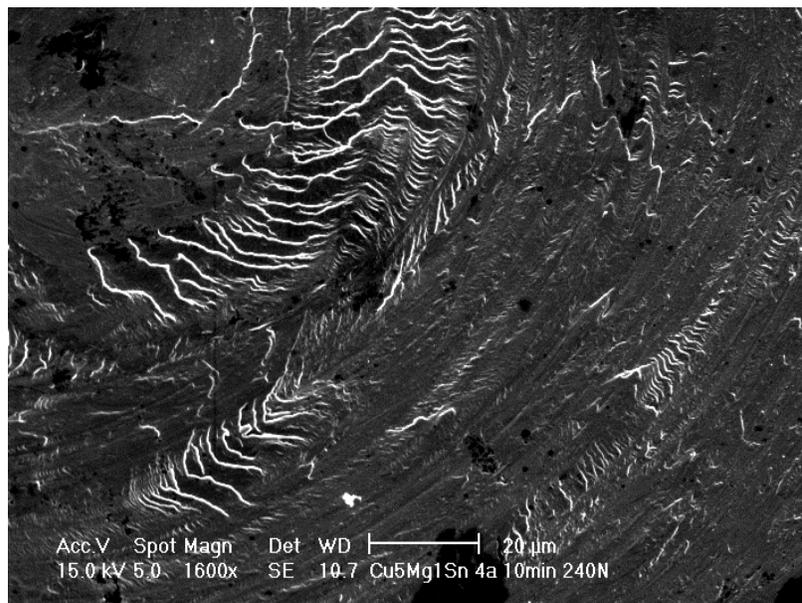
**Figura 4.18 Perfil de la zona de deformación plástica en una probeta Cu-5%Mg-1%Sn (10 minutos). Mechanical 3D®.**

En la figura 4.19 se muestra una imagen de microscopia electrónica con electrones retrodispersados de una huella de desgaste de un material Cu-5Mg-1Sn que se sometió a 10 minutos de ensayo a una carga de 240 N como se mostró anteriormente en la figura 4.17a en dicha imagen se puede observar una combinación de dos mecanismos de desgaste debido a los surcos que presenta la imagen, también es posible observar la microestructura de origen de nuestro material de estudio. También se observa una huella con una ligera excentricidad.

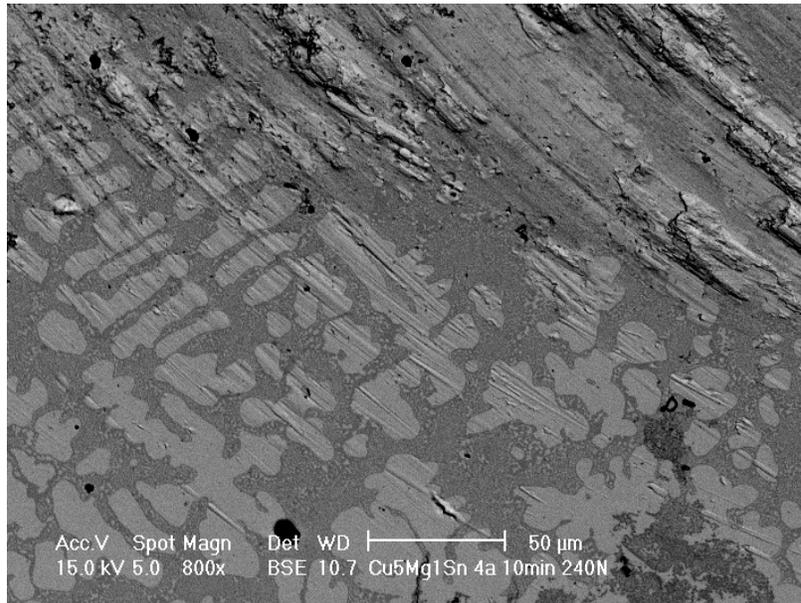


**Figura 4.19 Superficie de un material Cu-5Mg-1Sn (10 minutos).**

En la figura 4.20 se muestra una zona de una probeta de material Cu-5Mg-1Sn que presenta grietas típicas que caracterizan un desgaste adhesivo.



**Figura 4.20 Material Cu-5Mg-1Sn presentando desgaste adhesivo.**

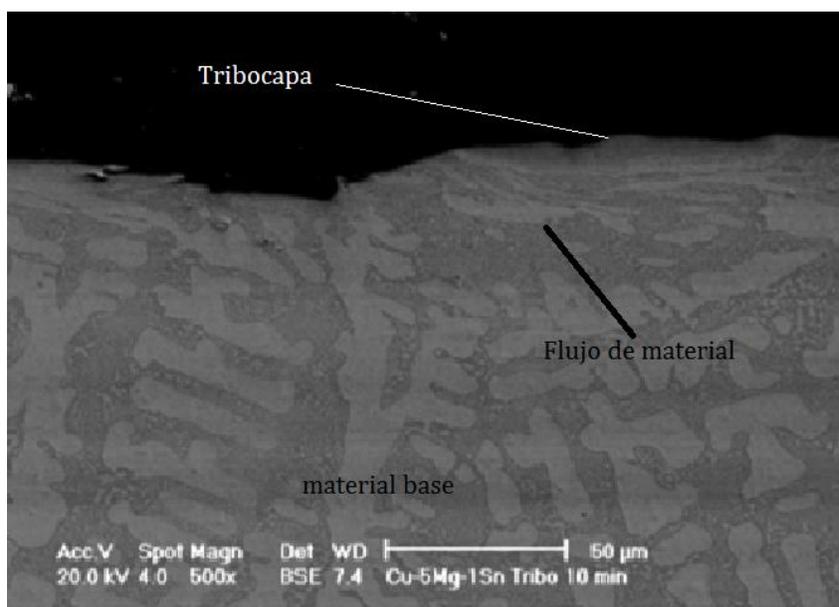


**Figura 4.21 Frontera entre el material ensayado tribológicamente y el de origen.**

En la figura 4.21 se muestra una frontera entre el material ensayado tribológicamente y el de origen y podemos ver como la fase que es más dúctil es la primera en ser rayada y desprendida para dar origen a una mezcla mecánica producto de una deformación plástica.

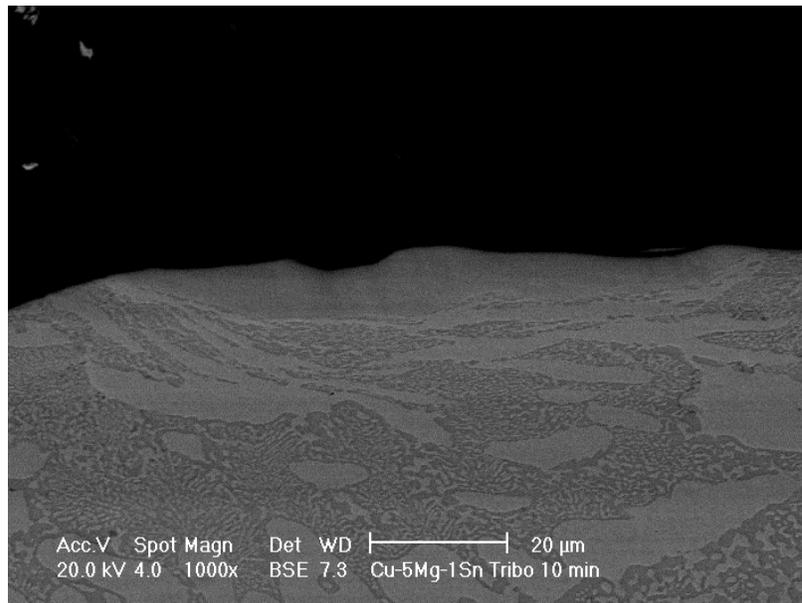
#### **4.3.5 Evolución de Microestructuras**

La aleación Cu-5Mg-1Sn se preparó de la misma forma que la anterior para así poder observar la sección transversal y ver la evolución de la microestructura en la zona de la huella de desgaste. En la figura 4.22 se muestra como el material base con una microestructura dendrítica empieza a tener un patrón de flujo volviéndose así una microestructura celular.

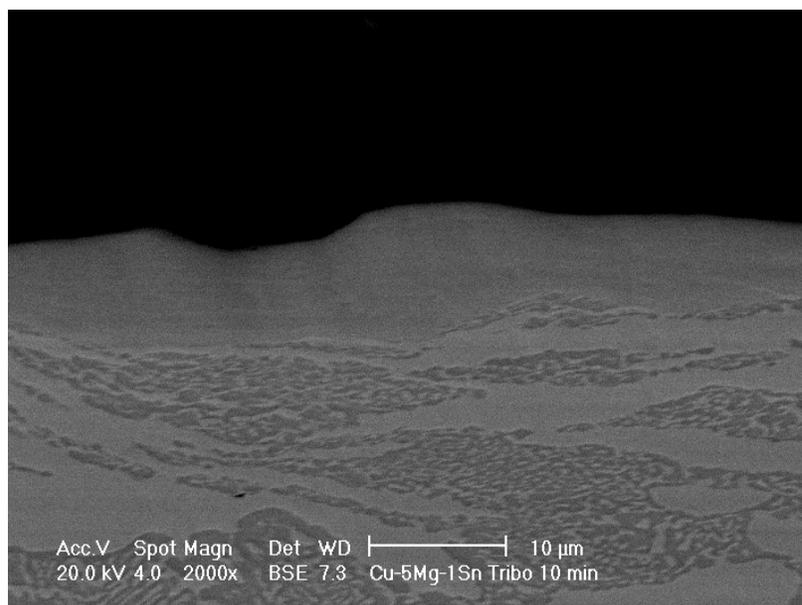


**Figura 4.22** Indicio de flujo de material.

A mayores aumentos se observó el patrón de flujo de material, además de una mezcla mecánica producto del desgaste que se presentó en el material. En la figura 4.23 se muestran las tres zonas en las que se puede dividir a lo largo de su espesor. Se puede observar en la parte superior una tribocapa, esto por un cambio en los tonos del material además de ser homogéneo, por debajo de esta es posible observar una zona de deformación plástica dado que la microestructura ha tomado un patrón de flujo alargado. Por último tenemos al material base.



**Figura 4.23 Tribocapa generada por desgaste**



**Figura 4.24 Formación de tribocapa después de 10 minutos de ensayo**

En la figura 4.24 con mayores aumentos es más fácil de apreciar la tribocapa y la zona de deformación plástica, puede observarse como de la parte inferior la microestructura dendrítica toma formas de listones más alargadas conforme se acerca a la zona de afectación por el perno de acero y en la parte superior la tribocapa generada por el desgaste.

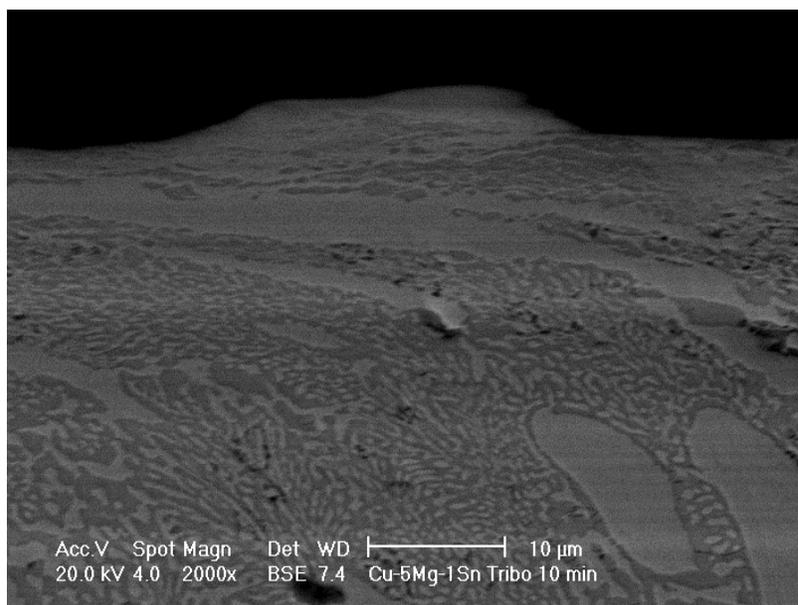


Figura 4.25 Flujo de material en una zona distinta.

### 4.3.6 Curvas de fricción

En la figura 4.26 se puede observar la evolución del coeficiente de fricción para una de las muestras de la aleación Cu-5Mg-1Sn en donde se observó que el coeficiente de fricción se comportó dentro de un rango de valores la mayor parte del ensayo, con un valor de 0.35.

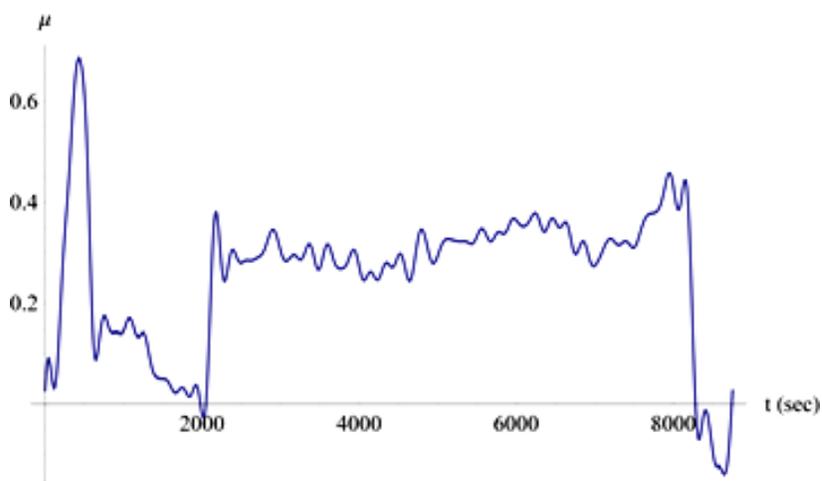
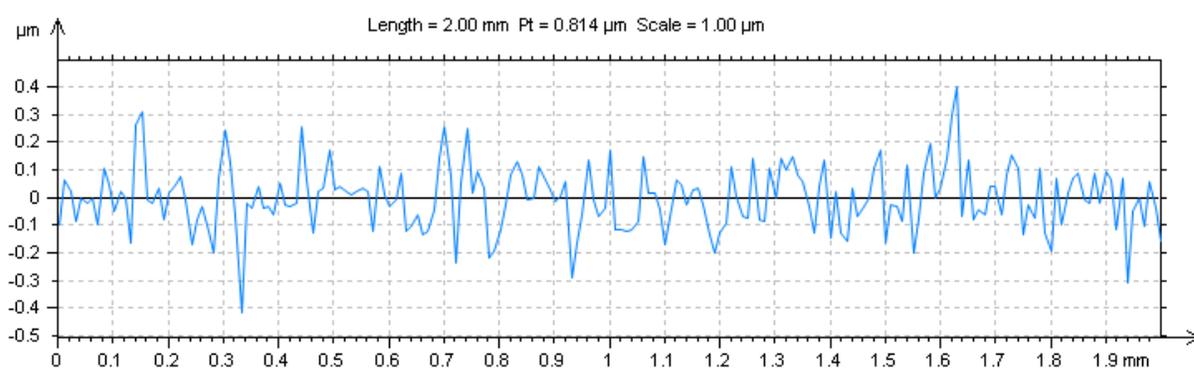


Figura 4.26 Evolución del coeficiente de fricción de la aleación Cu-5Mg-1Sn.

#### 4.4 Evaluación del material Cu-5%Mg-5%Sn

De la misma forma que se hizo con las probetas con las composiciones Cu-1%Mg-1%Sn y Cu-5%Mg-1%Sn se les realizó un proceso de pulido en la superficie previa al contacto con el perno del tribómetro logrando una rugosidad promedio  $R_a$  de 0.0667  $\mu\text{m}$  obtenido del mismo equipo de perfilometría óptica.



**Figura 4.27** Perfil de rugosidad de una probeta Cu-5%Mg-5%Sn. Mechanical 3D®.

En las figuras 4.27 y 4.28 se pueden observar los perfiles de rugosidad y una geometría representativa del material con acabado espejo.

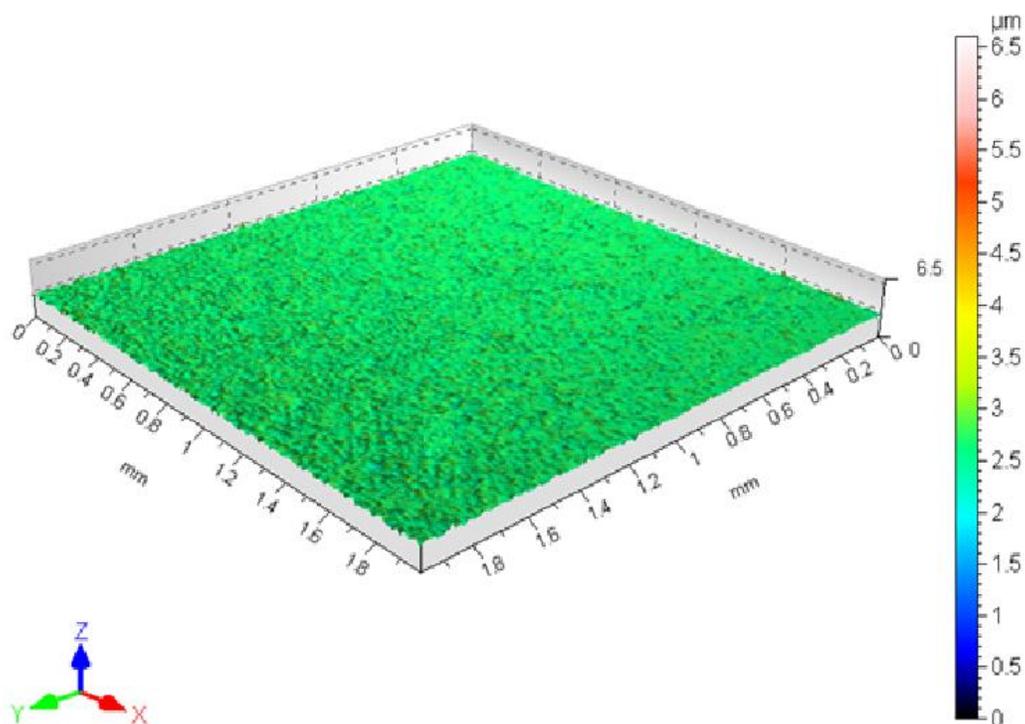
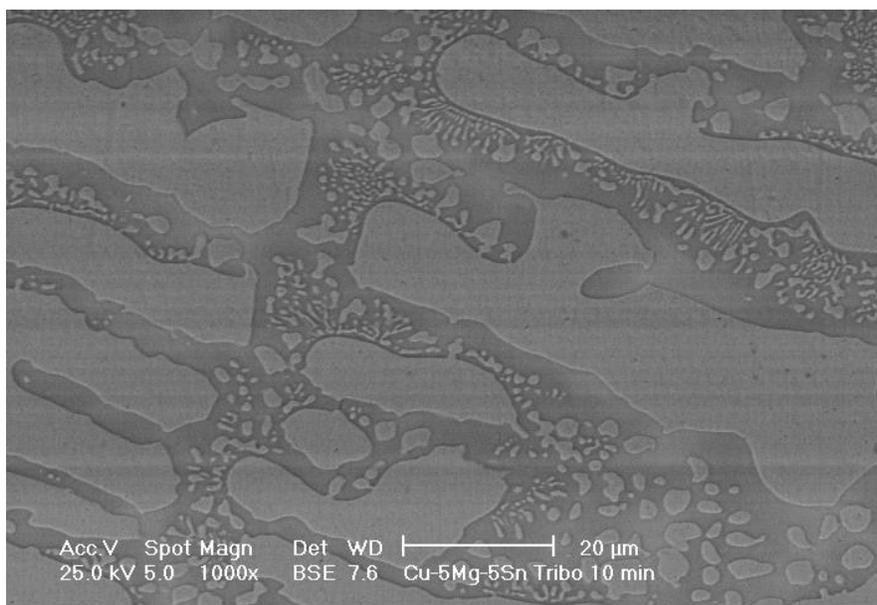


Figura 4.28 Perfil representativa del material de una probeta con acabado espejo Cu-5%Mg-5%Sn. Mechanical 3D®.

#### 4.4.1 Caracterización de microestructuras Cu-5%Mg-5%Sn.

La aleación Cu-5Mg-5Sn muestra una microestructura eutéctica con algunas regiones enriquecidas en Sn debido a la mayor microsegregación en una matriz de  $\text{Cu}_2\text{Mg}$  que son zonas más oscuras [31].



**Figura 4.29 Microestructura de una Cu-5Mg-5Sn.**

#### 4.4.2 Medición de masa

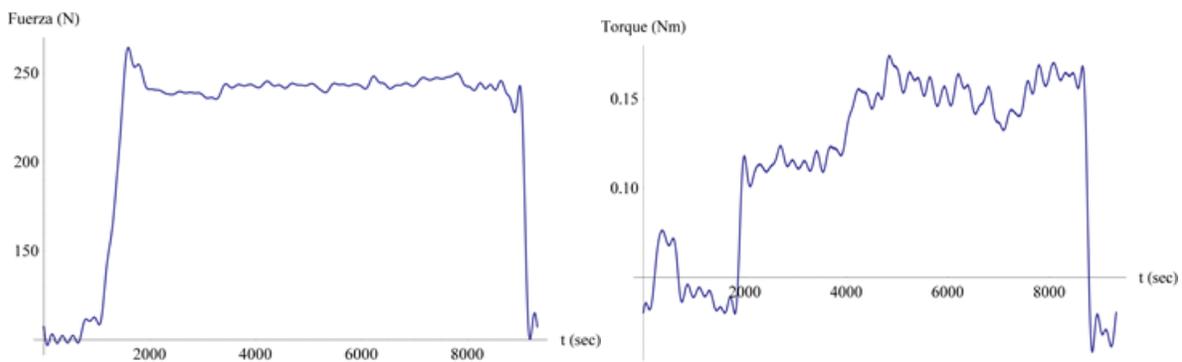
En la tabla 4.algo se muestran los valores de masa previa y posterior al ensayo tribológico en donde podemos ver que hubo una ligera disminución en la masa del material muy probable por la abrasión entre el perno y la muestra.

**Tabla 4.algo Valores de masa para cada probeta antes y después del ensayo.**

| Muestra | Masa inicial [g] | Masa final [g] | Diferencia [g] |
|---------|------------------|----------------|----------------|
| 1       | 11.4660          | 11.4621        | 0.0039         |
| 2       | 11.4620          | 11.4568        | 0.0052         |

#### 4.4.3 Ensayo tribológico

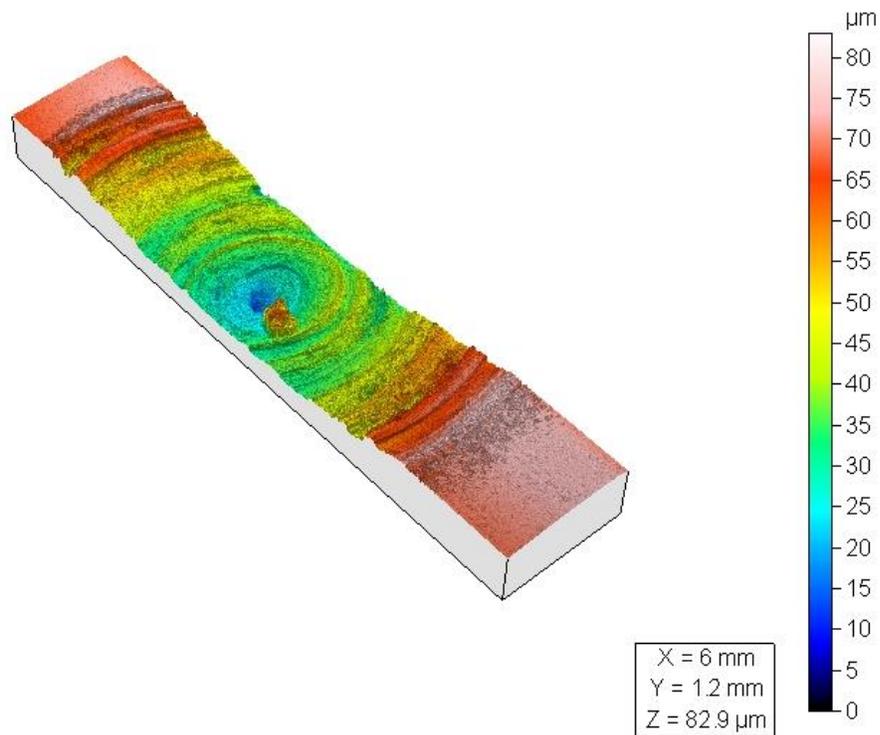
En las probetas del sistema Cu-5%Mg-5%Sn se analizaron los datos obtenidos por el equipo para después graficar sus respectivas curvas con los datos filtrados mediante la Transformada de Fourier y en la figura 4.30a podemos observar la gráfica que corresponde a la fuerza normal aplicada sobre la muestra, de manera constante mediante retroalimentación en el equipo. De la misma forma en la figura 4.30b se muestra el par medido durante el ensayo.



**Figura 4.30 Graficas de carga y torque filtrada, para el ensayo 1, Cu-5%Mg-5%Sn (10 minutos). Mathematica®.**

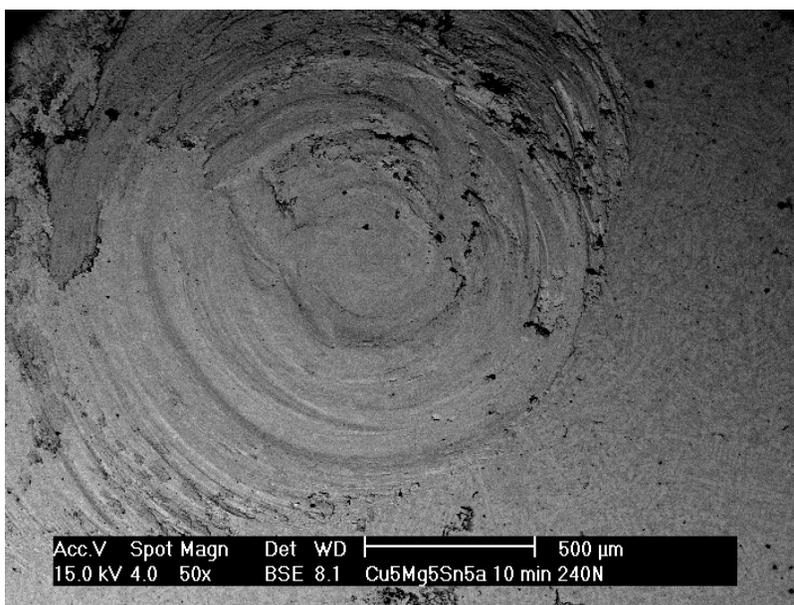
#### 4.4.4 Caracterización de superficies Cu-5%Mg-5%Sn

En las siguientes figuras se muestran las zonas más representativas en lo que respecta a la zona de deformación plástica generada por el perno en la probeta, la figura 4.31 fue obtenida mediante perfilometría óptica, para esta probeta se optó por solo mostrar la zona longitudinal de la probeta y posteriormente obtener valores de rugosidad en la superficie. Las siguientes micrografías fueron obtenidas mediante microscopia electrónica de barrido, mismas que muestran el desgaste en las probetas.



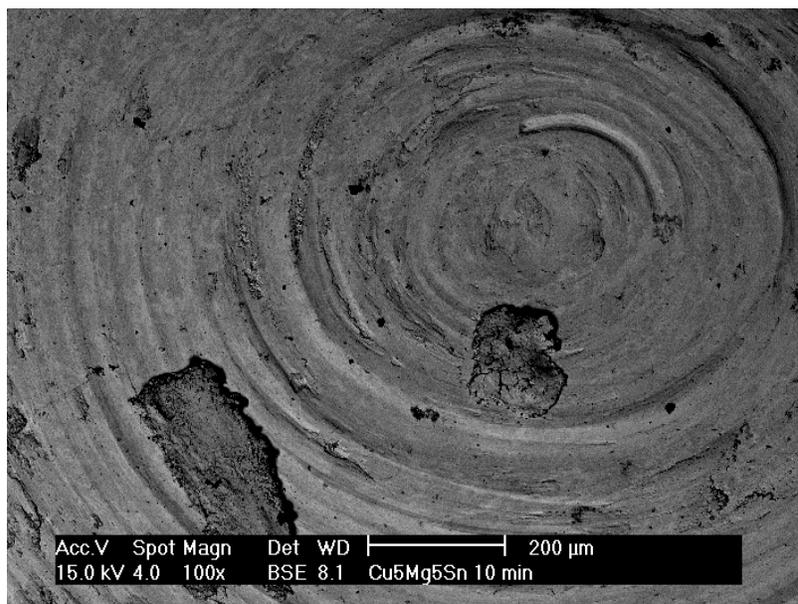
**Ilustración 4.31 Perfil longitudinal de la zona de deformación en una probeta Cu-5%Mg-5%Sn (10 minutos). Mechanical 3D.**

En la figura 4.32 se muestra la zona de mezcla mecánica generada por el perno de acero en la muestra. La micrografía fue obtenida mediante electrones retrodispersados que nos permiten observar a un costado de la huella la microestructura que caracteriza al material de estudio. La huella pertenece a un ensayo de 10 minutos donde se observa en la mayoría de la huella un desgaste adhesivo además de una excentricidad en la geometría.



**Figura 4.32 Superficie del material Cu-5Mg-5Sn ensayado tribológicamente durante 10 minutos.**

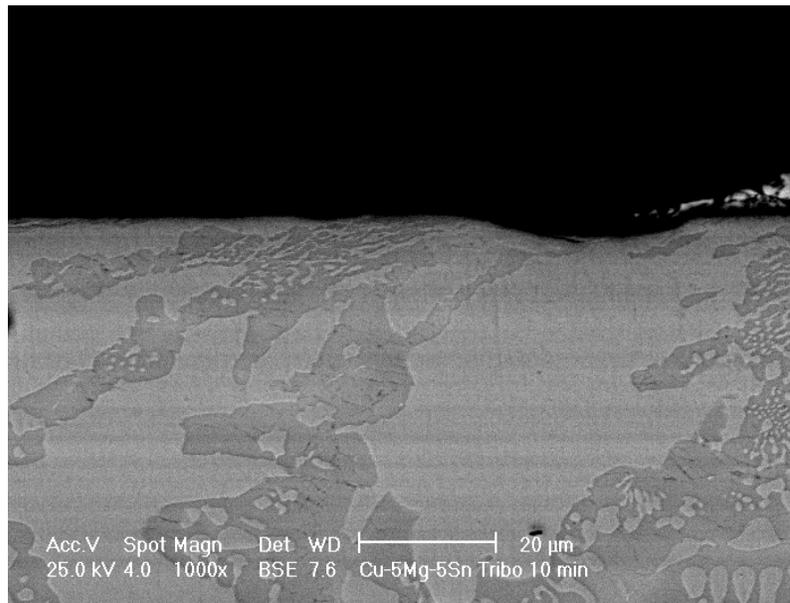
A mayores aumentos es posible observar el flujo del material de origen, se puede ver como las dendritas que son el compuesto más dúctil en el material tiende a fluir y generar un nuevo patrón, que deben dar paso a una mezcla mecánica.



**Figura 4.33 Superficie de material Cu-5Mg-5Sn**

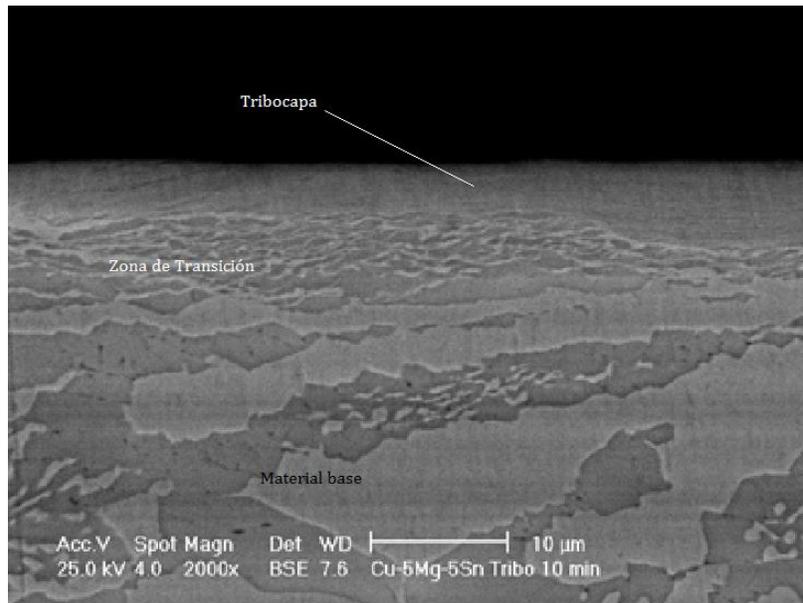
#### 4.4.5 Evolución de microestructuras

La aleación con la composición Cu-5Mg-5Sn se le aplicó la misma preparación para el ensayo tribológico y con ello observar la sección transversal de la huella de desgaste y lograr verificar la existencia o no de la tribocapa. En la figura 4.34 se muestra una parte de la zona transversal donde es posible ver algo de deformación plástica debido al perno.

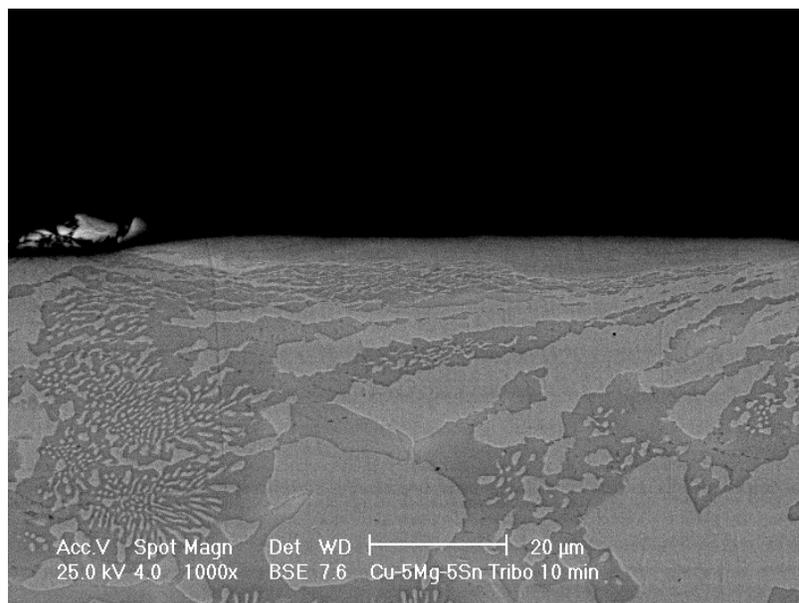


**Figura 4.34** Indicios de flujo de material base.

En la figura 4.35 se muestra otra zona a mayores aumentos, donde se puede ver con mayor claridad que se trata de una tribocapa debido al desgaste que se produjo durante el ensayo. En dicha figura es posible ver las tres zonas del material ensayado. En la parte superior una capa de espesor casi constante es la tribocapa seguida de la zona de transición donde existe una deformación plástica debido a los ciclos del perno y en la parte inferior el material base.



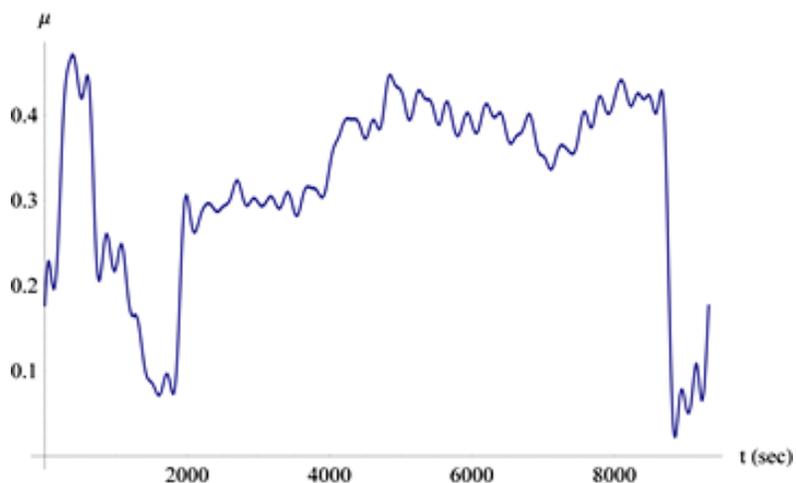
**Figura 4.35 Tribocapa y zonas de deformación plástica.**



**Figura 4.36 Tribocapa y deformación plástica generada por el perno.**

En la figura 4.36 se muestra la frontera entre la huella de desgaste y el material base en donde es posible observar un patrón en el flujo de material y como hacia la parte superior se va volviendo un tono más homogéneo en donde se encuentra una mezcla mecánica producto de carga aplicada por el perno.

#### 4.4.6 Curvas de fricción Cu-5Mg-5Sn

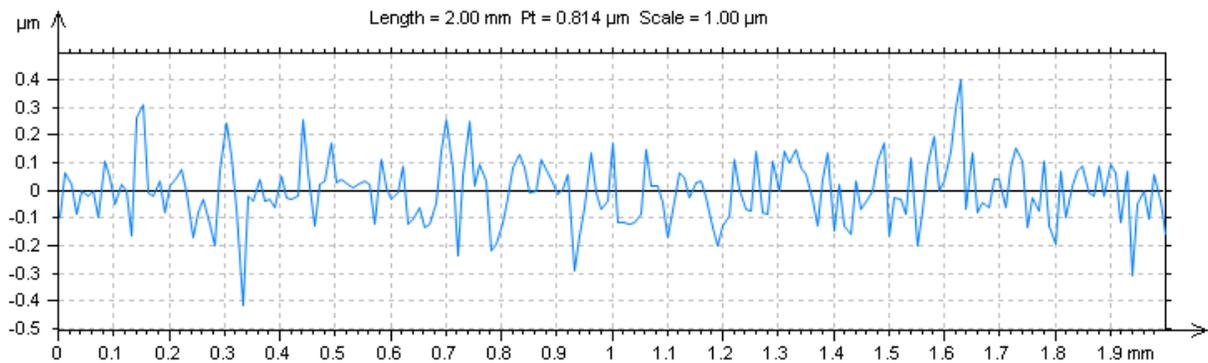


**Figura 4.37 Evolución del coeficiente de fricción de la aleación Cu-5Mg-5Sn.**

En la figura 4.37 se muestra la curva con la evolución del coeficiente de fricción para una de las muestras de la aleación Cu-5Mg-5Sn que fue sometida a ensayo tribológico el cual es representativo por obtenerse de la ecuación 2.5 en la que se ven involucrados el par y la fuerza normal aplicada en la muestra.

#### 4.5 Evaluación del material Cu-1%Mg-5%Sn

Para la evaluación del sistema Cu-1%Mg-5%Sn se llevó a cabo un proceso metalográfico que consistió en lograr un acabado espejo posteriormente obtener los perfiles de rugosidad máxima y promedio previas al ensayo tribológico, dichos valores se obtuvieron en las mismas condiciones de las probetas de las tres aleaciones anteriores. Los perfiles medidos mediante perfilometría óptica se pueden observar en la figura 4.38 y en la figura 4.39 tenemos una vista isométrica del material.



**Figura 4.38 Perfil de rugosidad de una probeta Cu-1%Mg-5%Sn. Professional 3D®.**

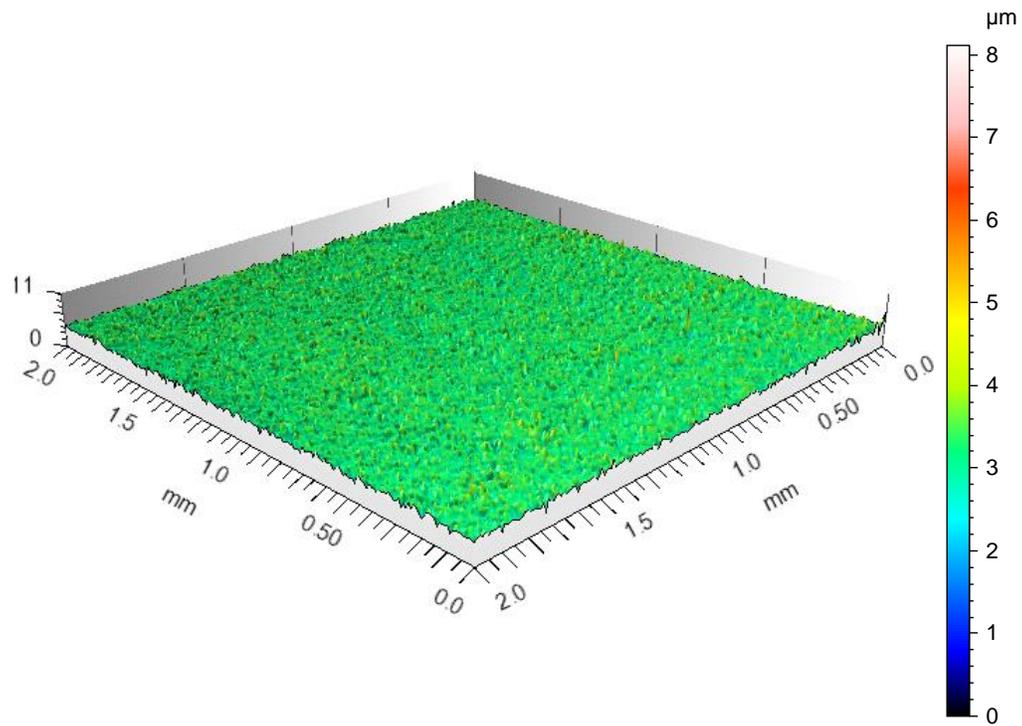


Figura 4.39 Vista isométrica del material de una probeta Cu-1%Mg-5%Sn. Mechanical 3D®.

#### 4.5.1 Caracterización de microestructuras Cu-1%Mg-5%Sn.

En la aleación Cu-1Mg-5Sn se muestra una microestructura fina eutectoide con zonas dendríticas.

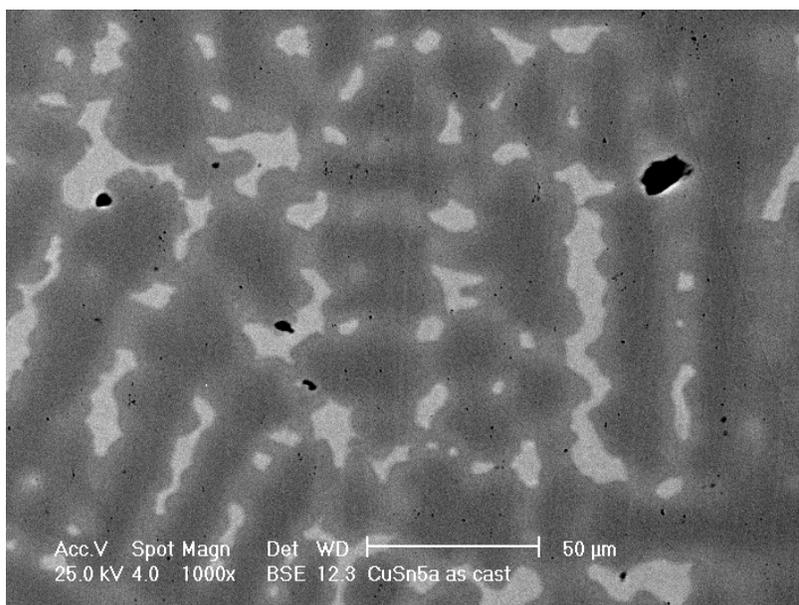


Figura 4.40 Microestructura de una aleación Cu1Mg5Sn

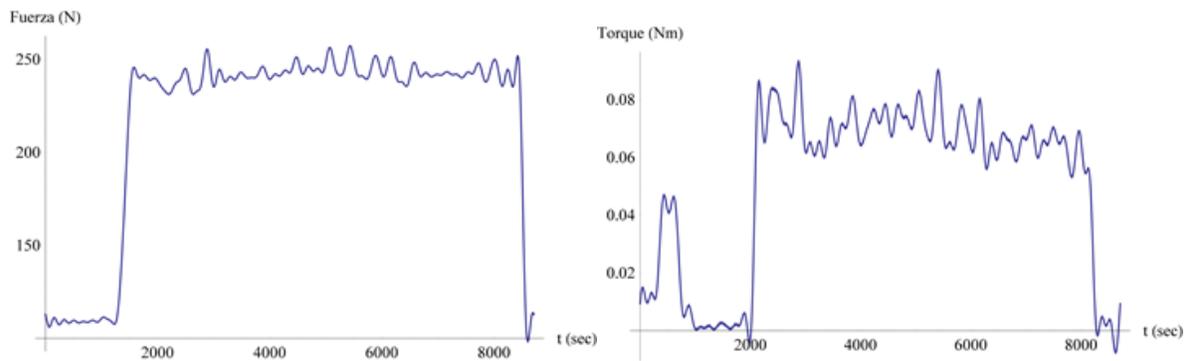
#### 4.5.2 Medición de masa

Tabla 4.2 Valores de masa para cada probeta antes y después del ensayo.

| Muestra | Masa inicial [g] | Masa final [g] | Diferencia [g] |
|---------|------------------|----------------|----------------|
| 1       | 12.4112          | 12.4107        | 0.0005         |
| 2       | 12.4107          | 12.4099        | 0.0008         |

#### 4.5.3 Ensayo tribológico

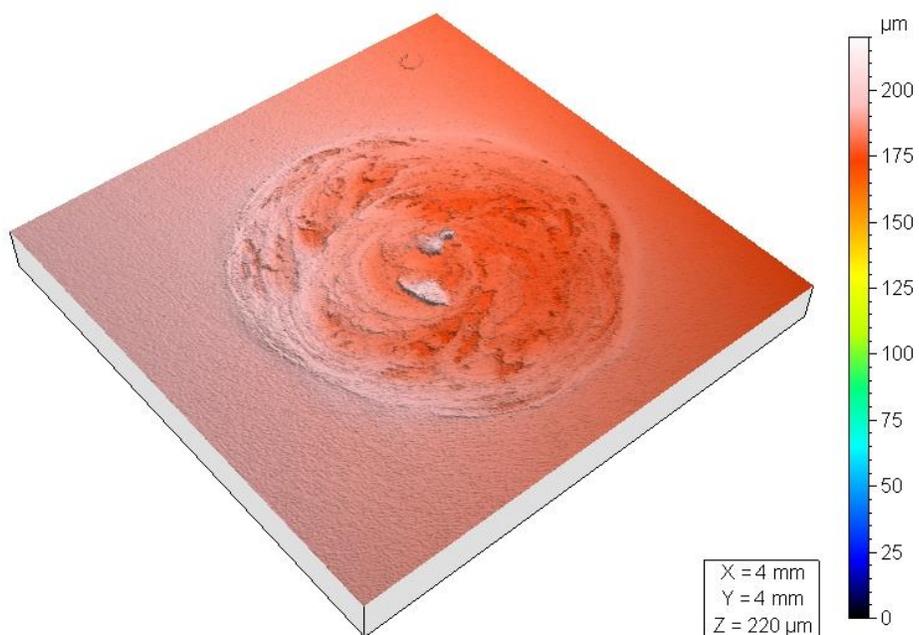
Las probetas del sistema Cu-1%Mg-5%Sn. En la figura 4.41a podemos observar la gráfica que corresponde a la fuerza normal aplicada sobre la muestra, de manera constante sin retroalimentación en el equipo con un valor cercano a los 240 N. De la misma forma en la figura 4.41b se muestra el par medido durante el ensayo.



**Figura 4.41 Graficas de carga y torque filtrada, para el ensayo 1, Cu-1%Mg-5%Sn (10 minutos). Mathematica®.**

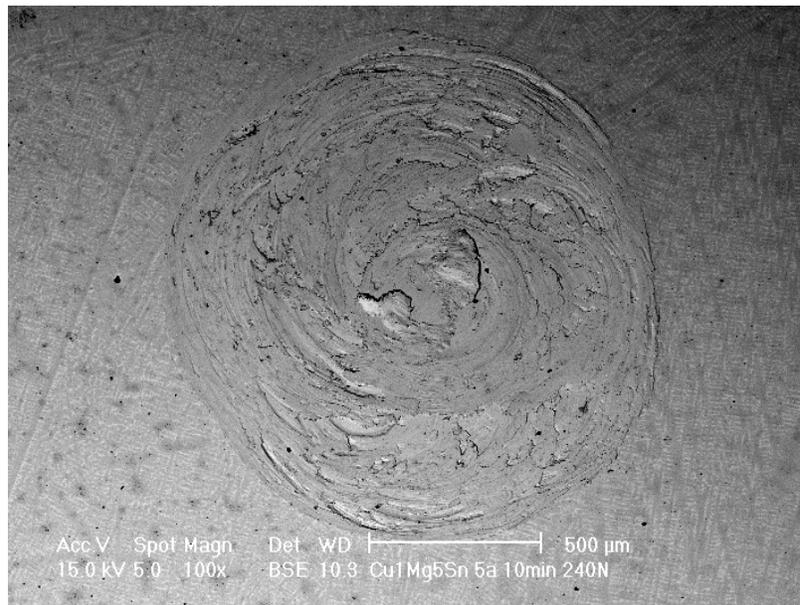
#### **4.5.4 Caracterización de superficies Cu-1%Mg-5%Sn**

En las siguientes figuras se muestran las zonas más representativas en lo que respecta a la zona de deformación plástica generada por el perno en la probeta la figura 4.42 fue obtenida mediante perfilometría óptica, para esta probeta se optó por mostrar la zona total de la huella en la probeta y posteriormente obtener valores de rugosidad en la superficie.



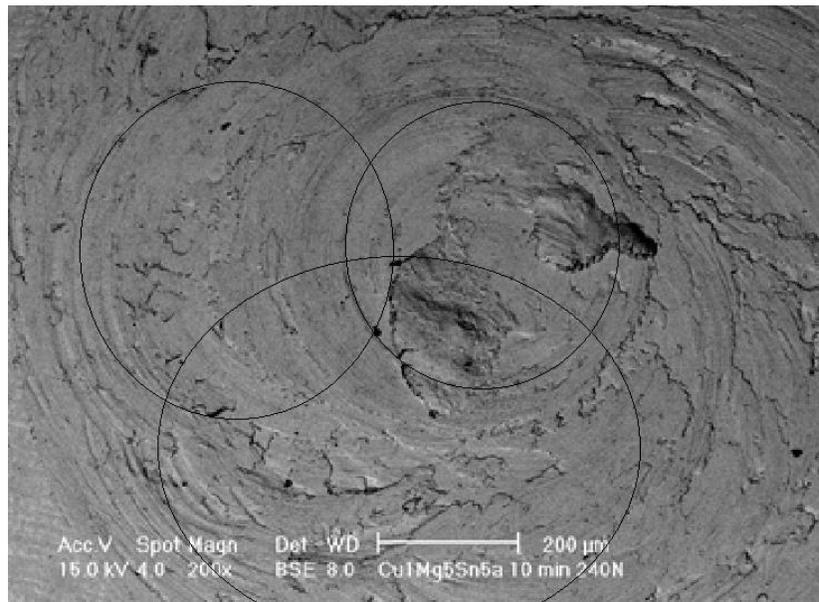
**Figura 4.42 Vista isométrica de una huella de una probeta Cu-1%Mg-5%Sn. Mechanical 3D®.**

En la figura 4.43 se puede observar una huella de desgaste generada por el perno de acero del tribómetro, misma huella que corresponde a la observada en la figura 4.42 de perfilometría óptica en la cual es posible observar la microestructura del material con electrones retrodispersados, además se puede notar un desgaste adhesivo en la mayoría de la huella.



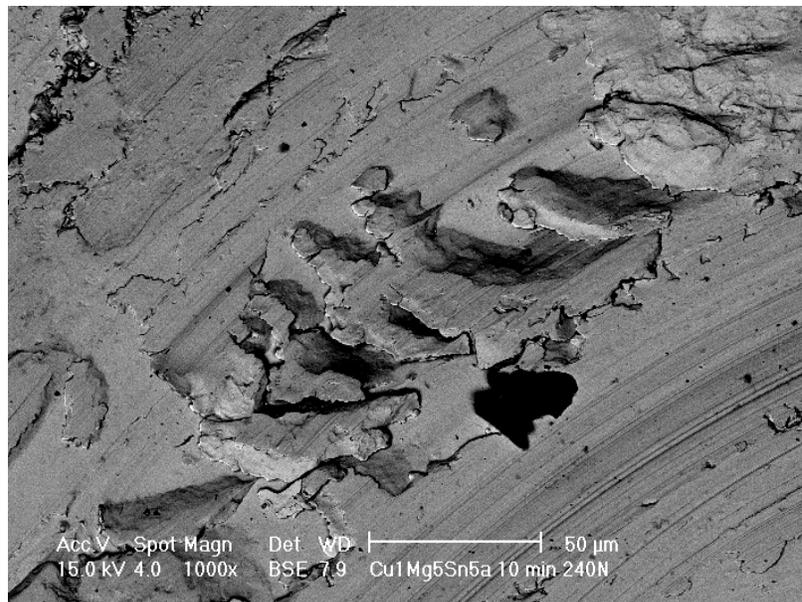
**Figura 4.43 Huella de desgaste generada por el perno del tribómetro.**

A mayores aumentos se puede observar un ligero cambio en la dirección del flujo de material, posiblemente debido a un cabeceo en el tribómetro, así como material depositado en la superficie central del material como se muestra en la figura 4.44.



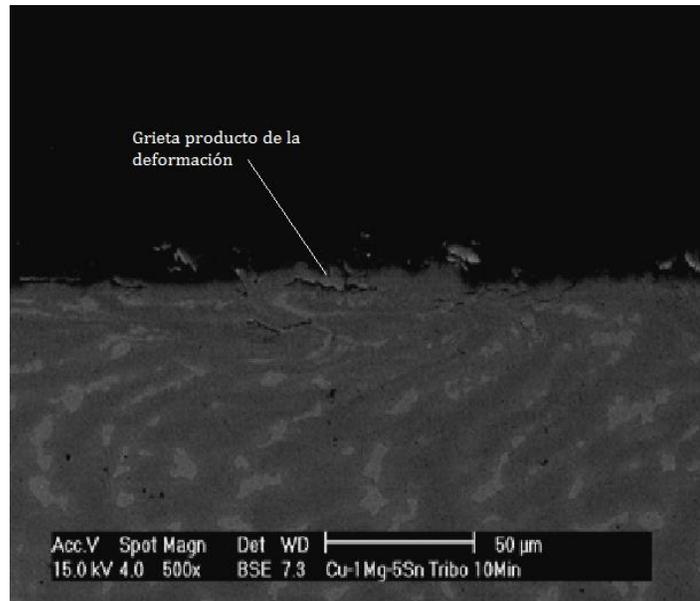
**Figura 4.44 Superficie de material Cu-1Mg-5Sn ensayado tribológicamente con aparente cabeceo. En la imagen se han sobrepuesto algunas circunferencias, donde es posible observar los distintos centros que adoptó la huella de desgaste.**

En la figura 4.45 se muestra una imagen de microscopia electrónica en donde se puede observar en la superficie grietas características del desgaste adhesivo, si bien no es el único mecanismo de desgaste que existe, es el más apreciado en esta probeta por el tipo de grietas y surcos que se generaron en la superficie después de un ensayo de 10 minutos.



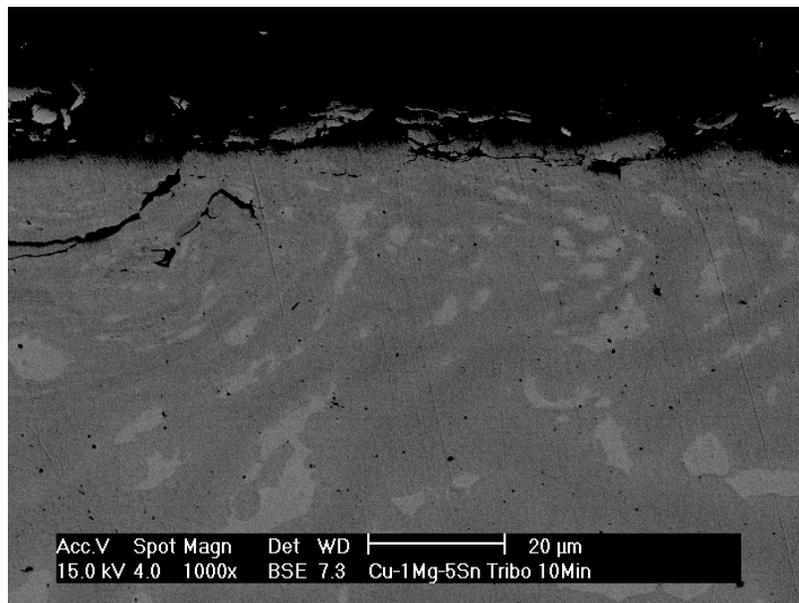
**Figura 4.45** Grietas características de un desgaste adhesivo en un material Cu-1Mg-5Sn.

#### 4.5.5 Evolución de microestructuras



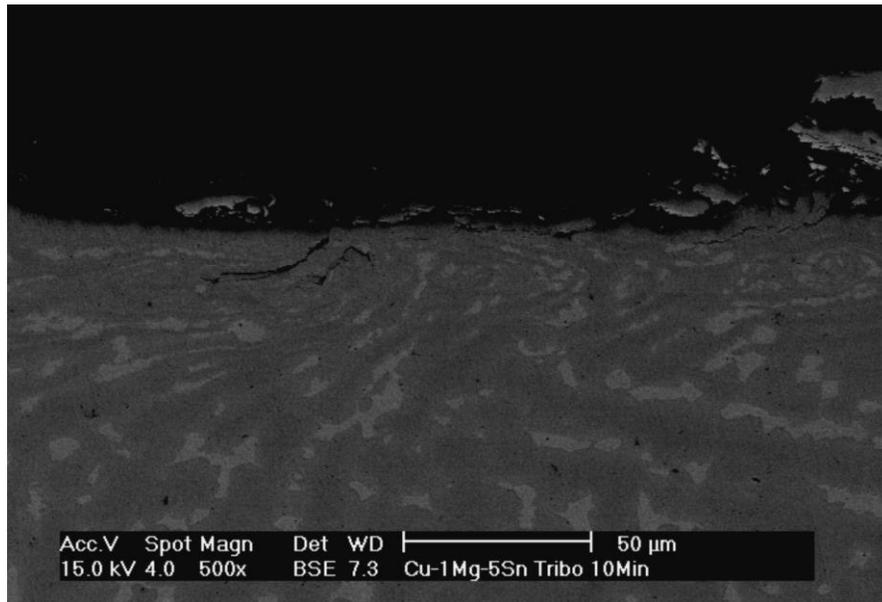
**Figura 4.46 Flujo de material**

En la figura 4.46 se muestra una zona de la sección transversal en donde se puede observar el patrón de flujo del material base que se hace más notorio conforme se acerca a la parte superior. También es posible observar una grieta producto de la deformación.



**Figura 4.47 División de tribocapa debido a una macro grieta.**

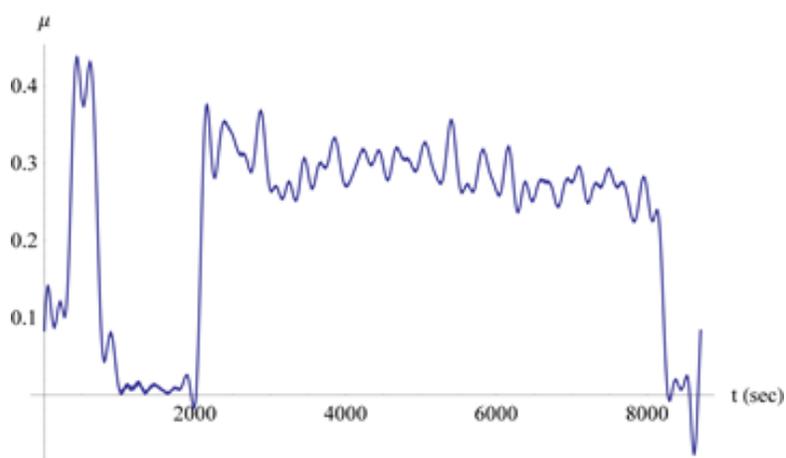
En la figura 4.47 se muestra una zona que se encuentra rodeada por material que por la microestructura y la morfología corresponde a la zona de deformación plástica debido al paso del perno por la superficie.



**Figura 4.48 Deformación plástica y grietas en la zona de contacto.**

En la figura 4.48 se aprecia una tribocapa dividida por una grieta de aproximadamente 40μm debido a la deformación plástica. Por lo que se puede observar la tribocapa estaba proceso de formación debido al paso del perno

#### 4.5.6 Curvas de fricción Cu-1Mg-5Sn



**Figura 4.49 Evolución del coeficiente de Fricción de la aleación Cu-1Mg-5Sn.**

En la figura 4.49 se muestra la curva de la evolución del coeficiente de fricción durante el ensayo para una de las muestras de la aleación Cu-1Mg-5Sn que fue sometida a ensayo tribológico el cual es representativo por obtenerse de la ecuación 2.algo en donde se ven involucrados el par y la fuerza normal aplicada en la muestra por el perno de acero.

## Capítulo 5.- Discusión

### 5.1 Resumen de resultados

En la tabla 5.1 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos en el ensayo tribológico. En donde se observa que el coeficiente de fricción  $\mu$  tiene una variación con respecto al primer ensayo, en la tabla se denota como muestra 1. Esto debido a problemas en la alineación del equipo, lo que provocó un cabeceo que es posible observar imágenes de la sección anterior.

Tabla 5.1 En la siguiente tabla se muestran los parámetros obtenidos en el ensayo tribológico.

| Muestra | Composición | R <sub>a</sub> [ $\mu$ m]<br>Previa | R <sub>a</sub> [ $\mu$ m]<br>Posterior | R <sub>q, rms</sub><br>[ $\mu$ m] | R <sub>max</sub><br>[ $\mu$ m] | $\mu$ | Pérdida de masa<br>(% en peso) |
|---------|-------------|-------------------------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|
| 1       | Cu1Mg1Sn    | 0.0512                              | 4.53                                   | 5.55                              | 19.5                           | 0.15  | 0.0064                         |
| 2       | Cu1Mg1Sn    | 0.0512                              | 3.79                                   | 11.2                              | 153                            | 0.8   | 0.0079                         |
| 1       | Cu5Mg1Sn    | 0.0422                              | 3.9                                    | 5.12                              | 35.9                           | 0.25  | 0.0154                         |
| 2       | Cu5Mg1Sn    | 0.0422                              | 1.65                                   | 3.61                              | 164                            | 0.75  | 0.0206                         |
| 1       | Cu5Mg5Sn    | 0.0771                              | 2.32                                   | 2.84                              | 24.9                           | 0.3   | 0.034                          |
| 2       | Cu5Mg5Sn    | 0.0771                              | 7.94                                   | 26.1                              | 235                            | 0.7   | 0.0453                         |
| 1       | Cu1Mg5Sn    | 0.206                               | 1.47                                   | 1.98                              | 13.2                           | 0.4   | 0.004                          |
| 2       | Cu1Mg5Sn    | 0.206                               | 1,28                                   | 1.72                              | 11.1                           | 0.6   | 0.0064                         |

### 5.2 Ensayo tribológico

En el ensayo tribológico realizado en estas nuevas aleaciones de CuMgSn se ha logrado la formación de tribocapas en las superficies de contacto con un perno de acero. La tribocapa se forma en cuanto la zona cercana a la superficie de contacto se deforma plásticamente, esto se demuestra con por lo menos una de tres pruebas que son las siguientes: patrones de flujo en la superficie, cambios en la microestructura y

rotación de marcadores [28]. En las micrografías mostradas en esta investigación se muestran algunas de estas pruebas.

En el ensayo tribológico que se realizó para este trabajo y como el equipo lo permite se pueden variar algunos parámetros como son:

- Carga normal aplicada
- Velocidad de giro del perno
- Tiempo de ensayo

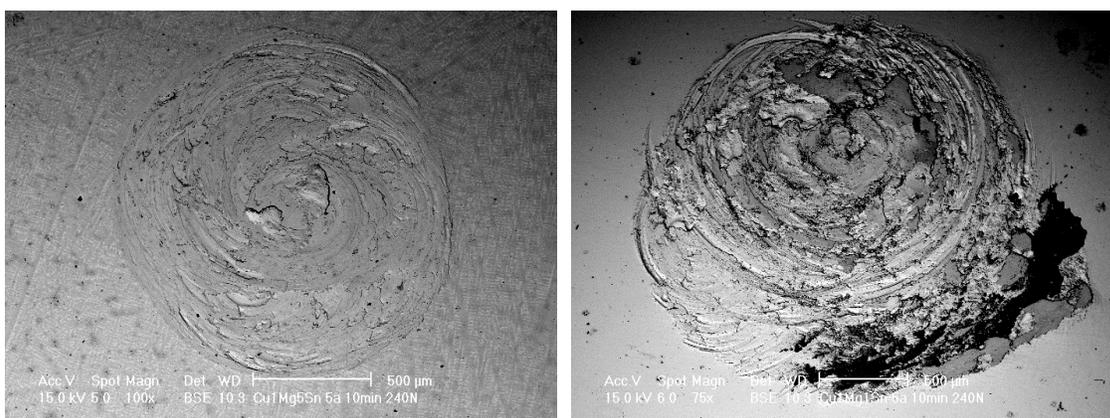
Cabe señalar que basado en resultados de trabajos anteriores se decidió mantener un solo valor de carga y velocidad de giro constante, el tiempo y la carga eran iguales para todas las aleaciones dado que el experimento se estandarizó para poder obtener comparaciones más interesantes.

El tribómetro coaxial aún no tiene en estos momentos la capacidad de mantener la velocidad de giro y la carga constantes. Las lecturas que se aprecian en los datos después de ser filtrados muestran una pequeña variación con el valor requerido.

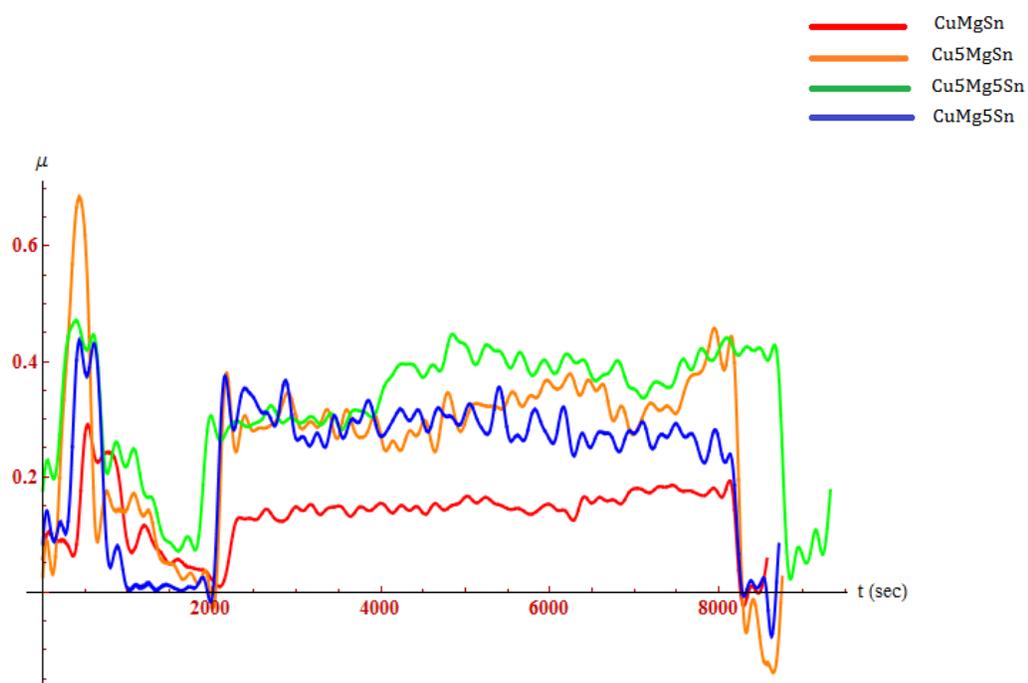
Durante la realización de este ensayo tribológico con cuatro aleaciones diferentes en donde se buscaba su caracterización y conocer como era su comportamiento en ensayos de desgaste, dado que estas aleaciones fueron hechas para poder sustituir a las actuales aleaciones de Cu-Pb que existen en el mercado en base a la tabla de Rabinowichz [36]. Aunque el tribómetro coaxial no reproduce las condiciones de un cojinete dentro de un motor de combustión interna, si se muestran las condiciones extremas de uso como en un arranque en frío o cuando el sistema de lubricación tiene una falla y la aleación se ve en la necesidad de actuar como aleación autolubrificante.

Las cuatro aleaciones son producto de un proceso de fundición que se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería con un control previamente establecido. El comportamiento que se tuvo fue el esperado, dado que comúnmente los materiales utilizados son de tratamientos termomecánicos, en este caso son de fundición. Estos materiales son aleaciones nuevas que se pretende sean empleadas para cojinetes de

uso en la industria automotriz, por eso fue que se decidió someterlas a ensayos tribológicos. Dichas muestras no presentaron grandes tasas de desgaste, ni tampoco se amarraron durante el ensayo, producto de adhesión y/o abrasión entre muestra y perno. Al observar las micrografías de la superficie de algunas de estas no presentan grandes daños, lo que sugiere que son adecuadas para ser utilizadas en motores de combustión.



**Figura 5.1** Diferentes acabados después del ensayo tribológico.



**Figura 5.2** Coeficientes de fricción. En la figura se muestran los coeficientes de fricción de cada aleación, nótese que la aleación con un menor coeficiente de fricción es la CuMgSn.

### 5.3 Desgaste

Otro de los factores que se midieron durante este trabajo fueron las tasas de desgaste mediante la medición de masas y la obtención de perfiles de rugosidad antes y

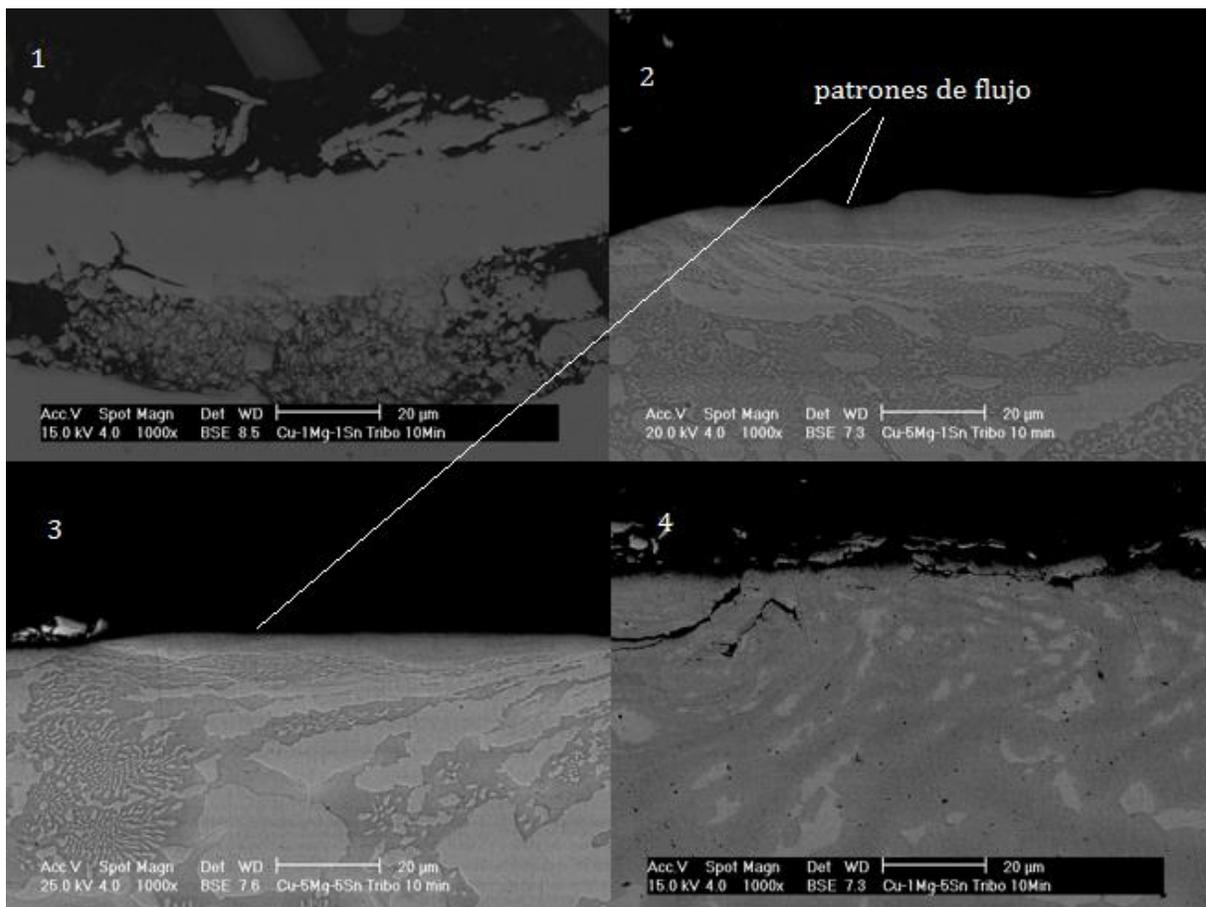
después del ensayo tribológico, cabe señalar que la obtención de los perfiles de rugosidad se obtuvieron mediante la técnica de perfilometría óptica.

La medición de masa se muestra en cada sección según el material que corresponda y no se presenta un cambio significativo en las probetas que fueron medidas mediante una balanza de precisión con una resolución de 0.0001g y los cambios no son mayores a 0.0052g. La diferencia puede ser atribuible a pequeñas partículas desprendidas en el material debido a la fragilidad por ser de un proceso de fundición [4].

#### **5.4 Microestructuras**

En la observación de las secciones transversales y las superficies de contacto se puede notar que cada material tiene un comportamiento diferente siendo así que la aleación Cu-1Mg-5Sn tiene un comportamiento más del tipo adhesivo mientras que la aleación Cu-1Mg-1Sn muestra una superficie con un daño más severo y abrasivo.

En cuanto a evolución de microestructuras en cada una se muestran micrografías con patrones de flujo, mezcla mecánica y en algunos casos adhesión de partículas abrasivas. En la figura 5.3 se muestran cada aleación con una micrografía a 1000x para comparar cada sección transversal. Cabe señalar que se muestran con una mejor mezcla mecánica las que tienen un mayor contenido de Mg.



**Figura 5.3** En la figura se muestran cada una de las aleaciones, todas a 1000X. Cabe señalar que en (2) y (3) se observa claramente una mezcla mecánica, posiblemente debido al mayor contenido de Mg.

### 5.5 Recomendaciones a futuro

El desarrollo de aleaciones tribológicas dentro del grupo de la UDIATEM ha tenido un largo desarrollo sin embargo, con la realización de esta investigación es posible notar que las aleaciones que se mostraron cuentan todavía con un gran potencial de estudio ya sea con mejoras en el tribómetro coaxial como son la retroalimentación de la carga y la velocidad de giro para tener parámetros mejor controlados.

Otra más es el uso de este mismo tipo de material con un normalizado y en el caso de las aleaciones que se han podido laminar incorporarlas al campo de estudio en donde posiblemente se encontraran nuevos resultados muy interesantes.

Por último incluir nuevas técnicas de estudio a las ya realizadas en este trabajo como difracción de rayos x y análisis químico para poder determinar si en realidad lo que nosotros vemos con un microscopio electrónico de barrido es un mezcla mecánica y tiene una diferente fase a la del material base, con mejores propiedades mecánicas debido a la deformación plástica [4,28].

## Capítulo 6.- Conclusiones

Se logró la generación de tribocapas a partir de una mezcla mecánica para las cuatro aleaciones, en algunas de manera uniforme, de gran proporción y en el caso de las que tienen un mayor contenido de Mg con mayor espesor.

Se logró caracterizar la superficie de contacto con varias técnicas entre ellas las de perfilometría óptica cromática y microscopia electrónica de barrido. Con esto fue posible caracterizar el daño en lo que se refiere a desgaste para las cuatro aleaciones de estudio en este trabajo.

La caracterización metalográfica reveló el espesor y la existencia de tribocapas en las probetas, comportándose de distinta forma según el material. La existencia de Mg parece dar lugar a una mejor formación de tribocapas.

De igual forma mediante la adquisición de datos se determinó la evolución de los coeficientes de fricción en cada una de las probetas, comportándose de mejor forma la aleación Cu-1Mg-1Sn.

## Bibliografía

1. Teo Mang, k. B. y Thosten B. (2011). *Industrial Tribology*. Germany: Wiley-VCH
2. Khonsari, M. M. y Booser, E. R. (2001). *Applied Tribology*. New York: Wiley
3. Tung S. C. y McMillan M. M. (2004). Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. *Tribology International*, 37: 517-536
4. Figueroa Alcántara C. G. (2011) *Caracterización de la compatibilidad tribológica en aleaciones dúctiles mediante un ensayo de tribometría coaxial*. Tesis, Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería
5. Ortmann Raimor, et al. (2003). *Técnica de los gases de escape para motores de gasolina*, 2nd ed. Stuttgart: Robert Bosch.
6. [http://www.energia.gob.mx/webSener/taller/res/1858/IEE\\_Mexico.pdf](http://www.energia.gob.mx/webSener/taller/res/1858/IEE_Mexico.pdf) [IEE, 19-08-2013].
7. Schouwenaars Franssens R. (2004). *Análisis de la deformación plástica durante el desgaste de cojinetes de deslizamiento*. Tesis, Doctorado en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
8. Stachowiak, G. W. y Batchelor, A. W. (2005) *Engineering Tribology*. 3<sup>rd</sup> ed. Sidney: Butterworth Heinemann.
9. Stolarsky, T. A. (1990). *Mechanical engineering tribology in machine design*. London: Butterworth Heinemann.
10. Andresen Eguluz R. C. et al, (2009) *Formación de una capa tribológica en la aleación SAE-783*. Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo, 3: 85-90.
11. [http://www.mahle-aftermarket.com/MAHLE\\_Aftermarket\\_EU/es/Products-and-Services/Engine-components/Bearings](http://www.mahle-aftermarket.com/MAHLE_Aftermarket_EU/es/Products-and-Services/Engine-components/Bearings), 19-08-2013.
12. Faires, V. M. (1992) *Diseño de elementos de máquinas*. 4<sup>a</sup> ed. México, Limusa Noriega.

13. Kato, Koji y Adachi, K. (2001) *Modern Tribology Handbook*. Volume Two: *Metals and Ceramics*.
14. Harnoy, Avraham (2003) *Bearing Design in Machinery: Engineering Tribology and Lubrication*. New York: CRC Press.
15. Bravo, Agustín, et al. (2010) *Desarrollo de las Técnicas de Producción y Estudio de la Solidificación de las Aleaciones Cu-Mg-Sn para Aplicaciones Tribológicas*. *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*, 4: 151-161
16. Losada, Carlos et al. (2001) *Tribología y lubricación en ensayo de banco*. *Ciencia Ergo Sum*, Volumen 8, 2: 184-190.
17. Ludema, K. C. (1996) *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. Florida: CRC Press LLC.
18. Kato, Koji y Adachi, K. (2001) *Modern Tribology Handbook*. Volume One: *Wear mechanics*.
19. Tylczak, Joseph H. (2004) *ASTM Metals Handbook*. Volume 18: *Abrasive Wear*.
20. Sahoo, Prasanta (2005) *Engineering Tribology*. India: Prentice Hall
21. Ludema, K. C. (2001) *Modern Tribology Handbook*. Volume One: *Friction*.
22. Williams, John (2005) *Engineering Tribology*. New York: Cambridge.
23. Larsen, Jorn (2004) *ASTM Metals Handbook*. Volume 18: *Introduction to Friction*.
24. ASME B46.1 (2009) *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)*. American National Standards Institute.
25. Totten, George E. y Liang, H. (2004) *Mechanical tribology Materials, Characterization, and Applications*. New York: CRC Press.
26. Shizhu, Wen y Ping, H. (2012) *Principles of Tribology*. India: Wiley.
27. Stachowiak, G. W. et al (2004) *Experimental Methods in Tribology*. 1a ed. Netherlands: Elsevier.
28. Andresen Eguluz R. C. (2010) *Análisis de la tribocapa en la aleación SAE 783 ensayada en un tribómetro coaxial*. Tesis, Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales.

- 
29. Leach, Reach (2011) *Optical Measuring of Surface Topography*. Berlín: Springer.
  30. Lara Paredes, G. (2013) *Rediseño de un tribómetro coaxial*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
  31. Bravo Bénard, A. E. et al (2013) Synthesis, Characterization and Cold Workability of Cast Copper-Magnesium-Tin Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions*. Volume 45: 555-562.
  32. Madsen, W. B. (2004) ASTM Metals Handbook. Volume 18: *Corrosive Wear*.
  33. <http://www.nanovea.com/brochures/profilers.pdf>
  34. <http://www.nanovea.com/Application%20Notes/woodsurfacemeasurement.pdf>
  35. <http://www.nanovea.com/Application%20Notes/oxidation-measurement.pdf>
  36. E. Rabinowicz. (1971) The Determination of the Compatibility of Metals through Static Friction Tests ASLE Trans, vol. 14 (3), pp. 198–205.
  37. B. S, Andersson (1991). Company perspectives in vehicle tribology-Volvo. In: 17th Leeds-Lyon Symposium on Tribology-Vehicle Tribology. Tribology series, 18. Oxford, UK: Elsevier Ltd; pp. 503–506.
  38. Stolyarov, V.V., et al. (2004) Reduction of friction coefficient of ultrafine-grained CP titanium. *Materials Science and Engineering*. Volume A371: 313–317
  39. [http://www.intercovamex.com/ic\\_perfilometria.html](http://www.intercovamex.com/ic_perfilometria.html)