



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS DE AL Y Al-Sn ENSAYADOS EN  
UN TRIBÓMETRO COAXIAL**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A:**

**JOSÉ FRANCISCO GARCÍA SANTAELLA**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. RAFAEL SCHOUWENAARS FRANSENS**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**2014**

# Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por la formación profesional y personal que he recibido.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por el apoyo económico brindado.

Al Rafael Schouwenaars y Carlos Figueroa quienes me asesoraron para realizar este proyecto y de quienes he aprendido tanto.

A Víctor Hugo Jacobo, Armando Ortiz, Edgar Ramírez y Agustín Bravo por sus valiosos comentarios al respecto de este trabajo. Asimismo a David Martínez, Hugo Durán y el resto de los miembros de la UDIATEM por toda su ayuda.

A mi familia por su apoyo incondicional.

A Pati por todo lo vivido y aprendido juntos.

# Índice

<b>Objetivos</b>	1
<b>Introducción</b>	2
<b>1 Antecedentes</b>	4
1.1 Cojinetes de deslizamiento	4
1.2 Tribología	4
1.2.1 Fricción	6
1.2.2 Lubricación	8
1.2.3 Desgaste	8
1.2.4 Tribocapas	10
1.3 Ensayos tribológicos	11
1.4 Materiales tribológicos y sus aplicaciones	13
1.5 Métodos de observación y análisis de muestras desgastadas	14
1.5.1 Cálculo del coeficiente de fricción de un par tribológico	14
1.5.2 Perfilometría óptica	18
1.5.3 Microscopía electrónica de barrido	19
1.5.4 Microscopía de fuerza atómica	21

<b>2</b>	<b>Desarrollo experimental</b>	<b>23</b>
2.1	Materiales	23
2.2	Preparación metalográfica	23
2.3	Ensayo tribológico	24
2.4	Visualización y caracterización de las superficies desgastadas	25
2.4.1	Perfilometría óptica	25
2.4.2	Microscopía electrónica de barrido	26
2.4.3	Microscopía de fuerza atómica	26
2.5	Obtención de los coeficientes de fricción	27
2.6	Visualización y caracterización de las tribocapas	27
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>29</b>
3.1	Ensayo tribológico	29
3.2	Visualización y caracterización de las superficies desgastadas	31
3.2.1	Perfilometría óptica	31
3.2.2	Microscopía electrónica de barrido	36
3.2.3	Microscopía de fuerza atómica	48
3.2.4	Coefficientes de fricción	49
3.2.5	Visualización y caracterización de las tribocapas	51

**Conclusiones**

60

**Bibliografía**

62

## Lista de abreviaciones y acrónimos

Abreviación	Definición
Al	Aluminio
SAE783	Aleación con composición aluminio-20% estaño-1% Cobre-0.6% hierro en peso
MEB	Microscopio electrónico de barrido / Microscopía electrónica de barrido
MFA	Microscopio de fuerza atómica / Microscopía de fuerza atómica
MM	Mezcla mecánica
TC	Tribocapa
ZDP	Zona de deformación plástica
BSE	Relativo al detector de electrones retrodispersados
SE	Relativo al detector de electrones secundarios

# Objetivos

- Generar mediante ensayos tribológicos zonas de mezcla mecánica en muestras de la aleación SAE783 (Al-20%Sn-1%Cu-0.6%Fe en peso) cuyas propiedades son óptimas para su utilización en cojinetes de deslizamiento para motores de combustión interna y de aluminio 1100 como material de referencia.
- Caracterizar las superficies obtenidas mediante perfilometría óptica, microscopía electrónica de barrido y microscopía de fuerza atómica.
- Caracterizar metalográficamente la tribocapa obtenida mediante microscopía electrónica de barrido.
- Obtener los coeficientes de fricción de cada material y relacionar los resultados con lo observado durante los ensayos y la caracterización.

# Introducción

Se estima que de una u otra forma, una tercera parte de la energía suministrada a máquinas, se consume por efecto de la fricción que se genera entre los componentes que se encuentran en contacto y movimiento relativo entre sí.

Los cojinetes de deslizamiento son elementos de máquina presentes en todos los motores de combustión interna y se someten a condiciones de fricción y desgaste, por lo que los materiales que los componen poseen propiedades muy específicas para soportar las severas condiciones de trabajo. Algunas aleaciones del aluminio muy específicas son ejemplo de éstos.

En este trabajo se estudiaron muestras de la aleación SAE783 y de aluminio 1100 sometidas a condiciones de desgaste controlado a través de un dispositivo de pruebas conocido como tribómetro coaxial. Posteriormente los materiales fueron analizados mediante técnicas de caracterización como perfilometría óptica, microscopía electrónica de barrido y microscopía de fuerza atómica. De esta manera, se busca comprender mejor el proceso de desgaste para avanzar en el desarrollo de nuevos materiales con los que se esperan lograr beneficios, energéticos, económicos y ecológicos.

El presente trabajo se ha estructurado de la siguiente manera:

El capítulo 1 corresponde a los antecedentes, se explican conceptos importantes como los de tribología, fricción, desgaste y lubricación. Se enumeran algunos de los materiales comúnmente utilizados en cojinetes así como los tipos de ensayos tribológicos que existen. Finalmente se describen de manera general las técnicas utilizadas.

En el capítulo 2 se revisa detalladamente el procedimiento experimental partiendo desde la preparación de las muestras. Posteriormente se hace énfasis en los ensayos tribológicos y en los métodos de análisis empleados.

Los resultados se presentan en el capítulo 3 donde se distinguen tres tipos: los resultados obtenidos durante el ensayo tribológico, los obtenidos a partir del análisis de las superficies y los relativos a la observación de la tribocapa.

Finalmente se muestran las conclusiones del estudio, se plantean los beneficios otorgados y las posibles mejoras, así como posibles experimentos futuros.

# Capítulo 1. Antecedentes

## 1.1 Cojinetes de deslizamiento

Los cojinetes de deslizamiento están diseñados para transmitir fuerza entre dos superficies en movimiento relativo, típicamente se utilizan para sostener ejes cuyo objetivo es transmitir par. Los más simples son utilizados sin lubricación, por lo que están expuestos a fricción y desgaste [1].

El campo de los cojinetes es muy amplio y laboran generalmente bajo condiciones severas. Los cojinetes en cigüeñales y bielas presentes en los motores de los automóviles son ejemplo de lo mencionado, ya que deben funcionar durante miles de kilómetros a altas temperaturas y bajo condiciones de carga variable [2].

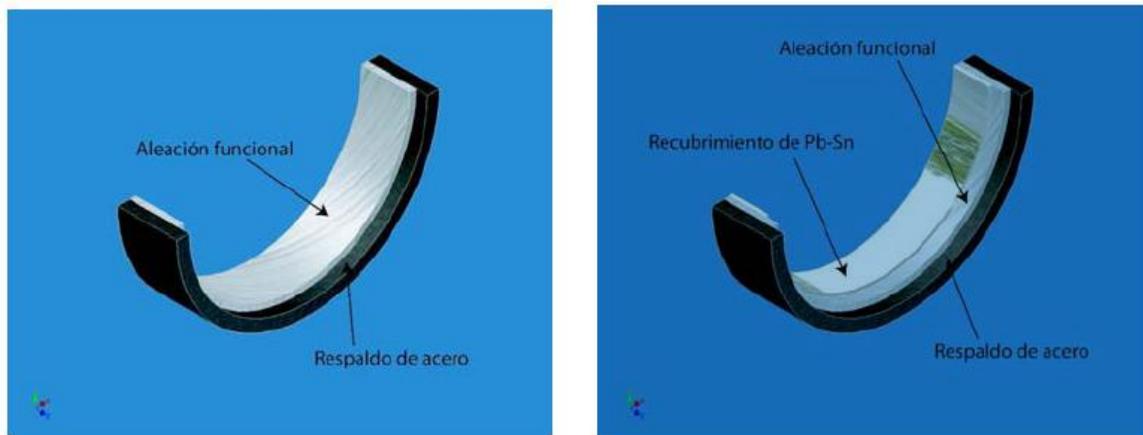


Figura 1.1 a) Esquema de un cojinete bimetalico. b) Esquema de un cojinete trimetalico [3].

## 1.2 Tribología

La tribología estudia la fricción, el desgaste y la lubricación de superficies en contacto y en movimiento relativo entre sí. Su nombre proviene de la palabra de origen griego *tribos* (τριβος) que significa frotar [4].

La fricción, la lubricación y el desgaste son fenómenos presentes en la naturaleza y suceden cotidianamente. Al ser así, sus conceptos son comúnmente reconocidos y sus procesos aparentemente carecen de interés para una significativa parte de la población, es por esto que la mayor parte del conocimiento que existe acerca de la tribología tiene un origen empírico.

Aunque se sabe que a través de la historia las civilizaciones antiguas desarrollaron elementos con superficies de baja fricción, la tribología prácticamente no había sido objeto de estudio formal hasta mediados del siglo XX con algunas pocas excepciones. A finales del siglo XV Leonardo da Vinci desarrolló muchas de las leyes básicas de fricción [4]. Después, y de manera independiente, en 1699 Guillaume Amontons propuso que las superficies estaban cubiertas de pequeñas esferas y que el ángulo de contacto entre éstas era lo que determinaba su coeficiente de fricción, creía intuitivamente que la causa de la fricción era la colisión entre irregularidades de las superficies [4, 5]. En 1785, Charles Coulomb, quien retomó los estudios de Amontons, afirmó que la fricción se debe únicamente a la interacción entre las asperezas, descartando las fuerzas intermoleculares entre las superficies, o sea, la adhesión [5]. Más adelante Osborne Reynolds probó que la presión hidrodinámica de los líquidos alojados entre superficies deslizantes prevenía del contacto entre ellas [4]. Fue hasta después de la segunda guerra mundial cuando su estudio formal adquirió importancia.

Uno de los objetivos inmediatos de la tribología es reducir el desgaste, que es la mayor causa de pérdidas en el desempeño mecánico y desperdicio de material. Los beneficios de una mayor comprensión de la tribología son muchos: van desde lo ecológico hasta lo económico. Se estima que de una u otra forma, una tercera parte de la energía utilizada a nivel mundial se utiliza para superar las pérdidas de carga por efecto de la fricción, ya que prácticamente todos los dispositivos creados por el hombre en los cuales existe movimiento relativo entre sus partes están sometidos a dicho fenómeno [4].

En general, como resultado de la observación y de mucha experimentación, se sabe que la tribología involucra el estudio de películas delgadas (líquidas y sólidas), formadas entre las superficies en contacto y que previenen el desgaste. Dicho fenómeno sucede de manera natural sin la intervención humana, como en las articulaciones del propio cuerpo humano o en el movimiento de placas tectónicas [4].

Actualmente, la tribología es una rama de estudio poco desarrollada en la que hay mucha investigación por realizar. Se trata de un campo de estudio conjunto, compuesto principalmente por cuatro áreas de la ciencia [5].

- *Mecánica de sólidos*. Enfocada al análisis de los esfuerzos de contacto y a los cambios de temperatura superficial debida al deslizamiento.
- *Mecánica de fluidos*. Orientada al análisis del comportamiento de lubricantes para diferentes formas y superficies.
- *Ciencia de materiales*. Trata los mecanismos atómicos y a escala micrométrica donde las superficies sólidas se alteran durante el deslizamiento.
- *Química*. Estudia la reactividad entre lubricantes o medios de trabajo y superficies sólidas.

### 1.2.1 Fricción

La fricción es la resistencia al movimiento tangencial de un cuerpo con respecto a otro. Se describe en términos de un coeficiente que casi siempre se asume constante para cada par de materiales en contacto [5, 7], comúnmente se calcula mediante el cociente de la fuerza de fricción (F) entre la componente normal de la reacción de la superficie (N):

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1.1)$$

Sin embargo, esta únicamente es una aproximación, ya que no se conoce con exactitud la naturaleza de estas fuerzas, pero generalmente se supone que son provocadas por las irregularidades de las superficies en contacto y a la atracción molecular entre las mismas [6].

Las leyes fundamentales de fricción, que se le atribuyen a Coulomb quien las formuló en 1875 al basarse en los trabajos previos de da Vinci y Amontons [7], se expresan a continuación:

“La fricción estática es mayor que la fricción cinética.”

“La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.”

“La fuerza de fricción es proporcional a la carga aplicada.”

“La fuerza de la fricción es independiente del área aparente de contacto. “

Sin duda estas leyes son aplicables en muchos casos, pero existen numerosas condiciones en las que no se cumplen [7] por lo que no pueden considerarse propiamente como leyes físicas.

Según los mecanismos que la generan, se puede clasificar la fricción en:

- *Fricción por adhesión.* Es un componente de gran importancia y se origina a partir de la ruptura y formación de enlaces, provocando adhesión entre las caras de las superficies. Teóricamente, las fuerzas de atracción en la zona de contacto son las mismas que dan resistencia al sólido (fuerzas de cohesión), tales como los enlaces metálicos, covalentes, iónicos y enlaces de Van der Waals. La presencia de cualquier lubricante interfiere con la formación de la unión adhesiva, reduciendo en gran medida esta componente.
- *Fricción por asperezas.* Este fenómeno ocurre cuando dos cuerpos en contacto tienen diferente dureza, provocando que las asperezas del elemento más duro penetren en el más suave, provocándole muescas si hay movimiento relativo. En ciertas situaciones, esta puede ser la mayor de las componentes de fricción.
- *Fricción por deformación.* Este tipo de fricción se debe a la energía mecánica disipada a través de la deformación plástica o viscosa que existe cuando dos cuerpos en contacto se deslizan [8].

Algunos de los más importantes desarrollos de la antigüedad se relacionan con la fuerza de fricción. El hombre aprendió a utilizarla para producir fuego, y también para desplazar objetos pesados, creando superficies de baja fricción bajo el concepto de la rueda [7]. Aún ahora está presente en muchos eventos en la vida cotidiana, así como en los procesos industriales donde puede ser tan útil como perjudicial, según lo que se

requiera. Así, los casos donde la fricción es deseable y donde no lo es, se pueden clasificar en cuatro categorías [5]:

- Componentes de transmisión de fuerza, en los que la fricción no sólo es deseable, sino fundamental para operar sin interferir en el desplazamiento.
- Componentes de absorción y control de energía, en los que se buscan materiales durables y con altos coeficientes de fricción.
- Componentes de control de calidad, en los que se requiere fricción constante.
- Componentes de baja fricción, en los que se busca la máxima eficiencia mientras se aplica una fuerza normal. La fricción es indeseable.

### **1.2.2 Lubricación**

La lubricación se da cuando una capa delgada de gas, líquido o sólido que se interpone entre dos superficies para mejorar o suavizar la interacción de movimiento de un cuerpo sobre otro, además de ayudar a disipar el calor y a apartar los restos de material [6, 9].

El proceso de lubricación se desarrolla de diferentes formas según la geometría de los cuerpos en contacto, la rugosidad y textura de las superficies, la carga de contacto, la presión y temperatura, la velocidad, las condiciones ambientales, las propiedades físicas y químicas del lubricante, la composición del material y las propiedades de la capa más superficial [9]. Se distinguen dos tipos de lubricación; la lubricación hidrodinámica que se lleva a cabo por medio de gases o líquidos y lubricación sólida [4].

### **1.2.3 Desgaste**

Se sabe que la fricción y el desgaste están ligados de manera compleja. El desgaste usualmente se asocia con la pérdida de material de cuerpos en contacto y en movimiento relativo. Es controlado por las propiedades del material, las condiciones ambientales y de operación y la geometría del cuerpo. Adicionalmente, un factor influyente en algunos materiales es la cinética del movimiento relativo en el área de contacto. De esta manera, se distinguen dos grupos generales de desgaste, los

relacionados con la naturaleza mecánica de los materiales y los de la naturaleza química [8]. Usualmente las superficies se desgastan por dos o más procesos simultáneamente y el balance de estos procesos cambia continuamente durante el ciclo [5].

Además, en muchas ocasiones se puede observar la falla de películas lubricantes superficiales entre cuerpos sólidos en contacto y movimiento relativo, provocando daños a las propias superficies. Una consecuencia a esta falla es el desgaste severo [4].

Típicamente, los mecanismos de desgaste se clasifican principalmente de la siguiente forma [8]:

- *Desgaste por adhesión.* Este tipo de desgaste está ligado con la formación de uniones adhesivas entre las superficies. Para que esta unión se dé, se requiere que los cuerpos estén en contacto íntimo entre ellos. La fuerza de la unión depende en gran parte de la naturaleza físico-química de las superficies. Se pueden identificar varias etapas en este tipo de desgaste [8].
  - i. Deformación de las asperezas en contacto
  - ii. Remoción de las películas superficiales.
  - iii. Formación de la unión adhesiva.
  - iv. Falla de las uniones y transferencia de material.
  - v. Modificación de los fragmentos transferidos.
  - vi. Remoción de los fragmentos transferidos y creación de partículas desgastadas sueltas.

Se sabe que el desgaste adhesivo es influenciado por parámetros de los materiales tales como la estructura electrónica, la estructura cristalina, la orientación cristalina y las fuerzas de cohesión

- *Desgaste por abrasión.* Es un desgaste bastante común y a la vez muy serio. Surge cuando dos superficies en interacción están en contacto físico directo y una de estas es significativamente más duro que el otro. Bajo fuerzas normales, la más dura penetra a la otra produciendo deformaciones plásticas. En este tipo de

desgaste, existe una relación cercana entre las propiedades mecánicas del material y la resistencia al desgaste [8].

- Desgaste por fatiga. El desgaste por fatiga se asocia con contactos rodantes por la naturaleza cíclica de sus cargas, sin embargo, también pueden surgir durante el contacto deslizante donde las asperezas están sujetas a cargas cíclicas, provocando concentración de esfuerzos que, a su vez, generan y propagan grietas. Las etapas de este tipo de desgaste son:
  - i. Transmisión de esfuerzos en puntos de contacto.
  - ii. Crecimiento de la deformación plástica por ciclo.
  - iii. Nucleación de grietas.
  - iv. Formación y propagación de grietas.
  - v. Generación de partículas de desgaste.
- *Desgaste por corrosión.* Es principalmente influenciada por el medio ambiente, al principio, las superficies reaccionan con el medio, generando productos de reacción que se depositan en las superficies, que posteriormente inducirán al material a agrietarse [8]. Una forma particular de este tipo de desgaste es cuando el material reacciona con oxígeno, a este mecanismo se le conoce como desgaste por oxidación.

Los desgastes adhesivo, abrasivo y por fatiga tienen como característica la deformación y fractura en el área de contacto y debido a la relación entre deformación y esfuerzos, estos tipos de desgastes se conocen como desgastes mecánicos. Por otro lado, el desgaste por corrosión es originado a partir de reacciones químicas por lo que es conocido también como desgaste químico [10] o desgaste por reacción química [8].

#### **1.2.4 Tribocapas**

Los principales medios de disipación de energía en los elementos de máquina son calor y generación de desgaste, así como el cambio de estructura del material más superficial [11], estos cambios suceden en una zona que varía su espesor según las condiciones del proceso de formación así como de la estructura del material sin deformar

[12]. Dichas capas que se forman debido a la acción tribológica son conocidas como tribocapas.

Las tribocapas poseen una microestructura, composición química y propiedades mecánicas distintas a las del material original [12]. Todos los cambios mencionados pueden dividirse en dos grupos, el primero es aquel que comprende los cambios independientes al material, a la contraparte y al medio químico; abarca deformación plástica, subestructuras formadas por deformación, inestabilidades por esfuerzos cortantes, texturas cristalográficas, transformaciones de fase y grietas. En el segundo entran aquellos que si dependen del material, de la contraparte y del medio químico, por ejemplo adhesión, oxidación, mezcla mecánica y transformación microestructural [13].

Las tribocapas (TC) son capas donde existe deformación plástica, provocando transferencia de masa. En una capa de transferencia, se mezclan elementos de los dos componentes en contacto, mientras que una capa de autotransferencia, se compone de las fases presentes del material original [10].

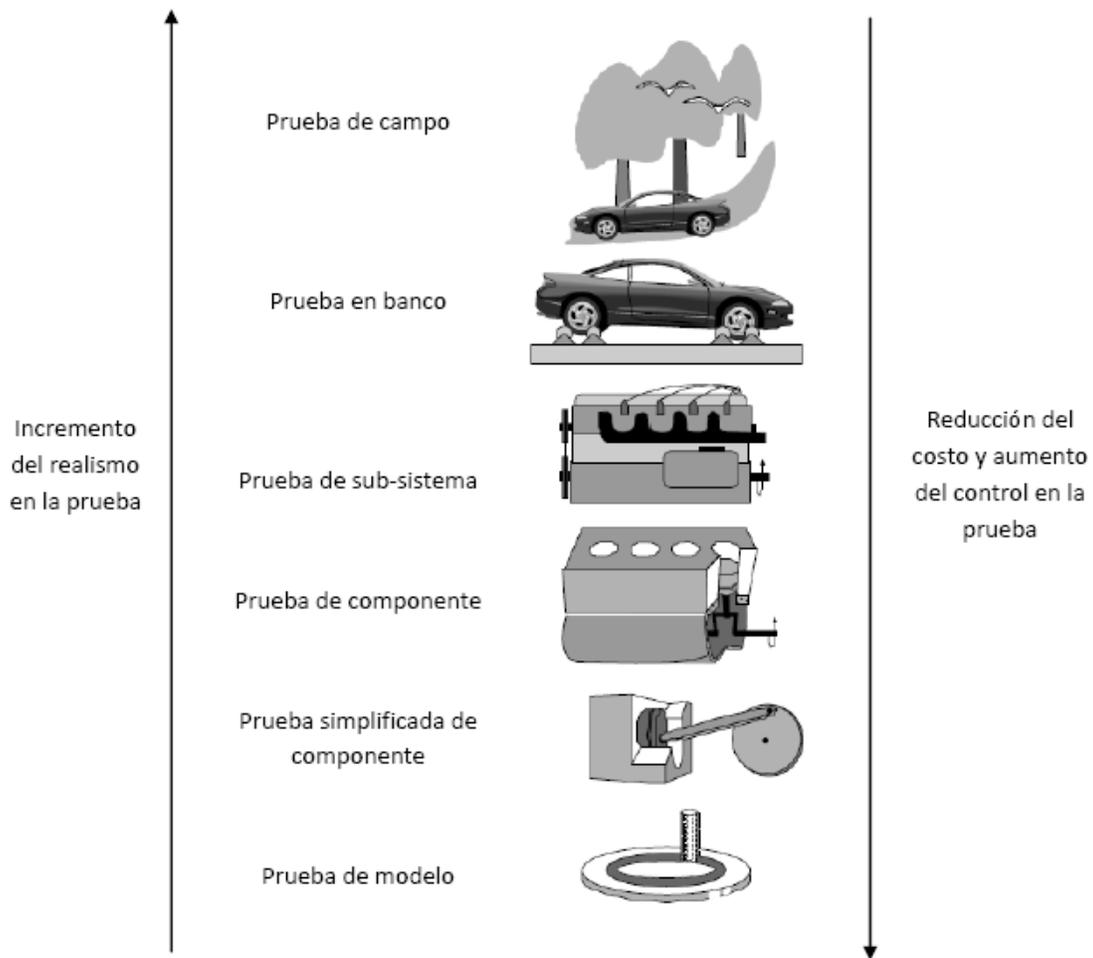
En el caso del cojinete, cuando la compatibilidad tribológica con el material de la flecha previene la formación de una capa de transferencia, suele formarse una capa de autotransferencia, sobretodo en casos de carga severa [13]. La deformación del material y la excesiva energía superficial provocan una fuerza impulsora que altera la microestructura a través de procesos difusivos provocando la formación de una fase fuera de equilibrio [14].

### **1.3 Ensayos tribológicos**

Un ensayo tribológico tiene como propósito incrementar el conocimiento acerca del comportamiento de los materiales utilizados en situaciones donde existe fricción y desgaste [10].

Los ensayos tribológicos pueden realizarse dentro de una gama extensa de métodos dependiendo del objetivo específico del mismo. Se pueden clasificar estas pruebas según el nivel de aproximación a las condiciones reales de servicio, es decir, según la aplicación real que tendrá el material de estudio en la vida cotidiana. Además de esto, también es importante considerar los recursos requeridos por cada prueba,

incluyendo los costos. Uno de los criterios más aceptados identifica cinco niveles de pruebas. Por ejemplo; si se desea evaluar el comportamiento tribológico de un sistema cilindro-pistón para un motor de combustión interna de un coche, el experimento podría realizarse dentro del propio automóvil, obteniendo así las condiciones reales de operación; ahora bien, si los costos son muy elevados, se podría llevar a cabo la prueba únicamente del sistema a evaluar, lo que implicará un mayor control sobre la prueba que en el caso anterior. Siguiendo esta lógica hasta alcanzar el nivel más esencial, se tendrá el mayor control posible sobre los ensayos, así como el menor costo (Figura 1.2).



**Figura 1.2 Clasificación de pruebas tribológicas según su nivel de realismo [15].**

Adicionalmente, las pruebas tribológicas pueden clasificarse en abiertas o cerradas según el tipo de contacto tribológico. Si una superficie sigue continuamente la misma pista, se habla de una prueba cerrada, si la superficie de contacto se renueva constantemente, se trata de una prueba abierta. También se puede especificar si el contacto involucra impacto o hacer distinción entre deslizamiento unidireccional o recíproco [15].

Para este estudio es de particular interés el ensayo tribológico coaxial. Consiste en hacer girar un perno de geometría conocida, que se encuentra en contacto con una superficie plana, aplicando de esta manera una carga normal sobre dicha superficie.

A partir de este tipo de ensayos y con equipo adecuadamente instrumentado, es posible obtener datos de carga normal y torque durante todo el experimento. Posteriormente y utilizando estos datos, se calcula el coeficiente de fricción entre los elementos que interactúan bajo la acción tribológica. Una propuesta de dicho procedimiento de cálculo se describe más adelante en la sección 1.5.1.

## **1.4 Materiales tribológicos y sus aplicaciones**

Se conocen como materiales tribológicos a aquellos que presentan ciertas características deseadas y específicas tales como reducir la fricción y el desgaste en situaciones de contacto y movimiento relativo, permitiendo realizar una selección adecuada según los requerimientos de cada aplicación. Así, es claro que uno de los objetivos principales de la tribología es el diseño y optimización de materiales para aplicaciones tribológicas [10].

Los materiales tribológicos son comúnmente utilizados en engranes, levas, frenos, embragues y cojinetes. Para este estudio son de particular interés los cojinetes automotrices para cigüeñales y bielas.

Una gran variedad de materiales se han utilizado para mejorar el desempeño de los cojinetes de deslizamiento. Algunas de los materiales tribológicos son [1]:

- *Base de plomo y base estaño (babbits)*. Contienen más del 80% en peso de plomo, de 1 a 10% de estaño y de 10 a 15% de antimonio. Tienen poca resistencia a la fatiga por la segregación de Sb-Sn durante la solidificación. Las aleaciones a

base de estaño tienen más del 85% en peso de este elemento, de 5 a 8% de antimonio y de 4 a 8% de cobre, estas últimas poseen mayor resistencia a la fatiga que las anteriores. Además tienen la capacidad para atrapar partículas desprendidas o ajenas, Sumado a una buena conformabilidad que permite la correcta operación de un sistema mal alineado o con lubricación deficiente.

- *Base de aluminio.* Se utilizan cuando se requieren cojinetes con mayor resistencia a la fatiga y mayores temperaturas de operación. Las aleaciones de aluminio-estaño son hasta tres veces más resistentes a la fatiga que los babbitts y tienen mayor compatibilidad tribológica con el acero. La aleación Al- 20%wt Sn es más barata y posee mayor resistencia al desgaste. Además de todo esto, muestran mejor resistencia a la corrosión.
- *Base cobre.* Las aleaciones a base de cobre son utilizadas debido a su gran resistencia y alta compatibilidad tribológica con el acero. Contienen de 5 a 13% en peso de estaño y de 1 a 5% de Zinc, poseen compuestos intermetálicos que aumentan su resistencia, haciéndolas útiles para grandes cargas. Otras aleaciones a base de cobre, de 4 a 6% en peso de estaño y de 4 a 6% de zinc forman glóbulos de estaño en la matriz de cobre.
- *De hierro fundido.* Se utilizan para cargas relativamente pequeñas, el bajo costo es su principal ventaja aunque tienen reducida incrustabilidad y conformabilidad.
- *Metales porosos.* Son de metal sinterizado, tienen poros de interconexión donde se aloja aceite que funciona como lubricante.
- *Polímeros.* Tienen buena compatibilidad, producen poco ruido durante el funcionamiento y no se corroen, la desventaja principal es que no sirven para altas temperaturas, cargas ni velocidades [16].

## **1.5 Métodos de observación y análisis de muestras desgastadas**

Las técnicas más utilizadas para medir desgaste son las mediciones de peso y de dimensiones. La medición de peso suele ser complicada debido a que las cantidades de material removido son muy pequeñas para ser medidas con precisión, además es poco precisa ya que el desgaste está distribuido de manera desigual en la superficie [17]. Por otra parte, la medición de dimensiones lineales, de área o de volumen, dependerá en gran medida de la cantidad de desgaste generado. Es conveniente para dicho fin utilizar técnicas topográficas y de microscopía [17, 18].

Medir la fricción involucrada, así como identificar el tipo de mecanismo de desgaste y los daños superficiales son acciones importantes en un ensayo tribológico [17].

### 1.5.1 Cálculo del coeficiente de fricción en el ensayo tribológico coaxial

Para calcular el coeficiente de fricción de un par de materiales que actúan en un ensayo tribológico coaxial se planteó el siguiente procedimiento que se basa en la figura 1.3.

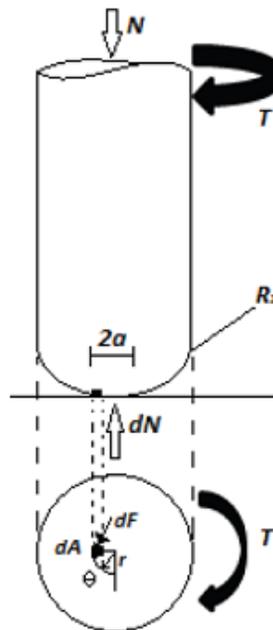


Figura 1.3 Esquema de fuerzas involucradas en un ensayo tribológico coaxial

El torque  $T$  generado por la fricción se define mediante la siguiente integral:

$$T = \int r dF \quad (1.2)$$

Donde  $r$  es el radio del área infinitesimal y  $dF$  es la diferencial de la fuerza de fricción.

Por otra parte el coeficiente de fricción se define de la siguiente forma:

$$\mu = \frac{dF}{dN} \quad (1.3)$$

También se puede considerar el esfuerzo generado por la carga normal  $dN$  sobre el área  $dA$ :

$$\sigma = \frac{dN}{dA} \quad (1.4)$$

Donde:

$$dA = rd\theta dr \quad (1.5)$$

Por lo que al sustituir (1.3) y (1.4) en (1.5) se obtiene:

$$dF = \mu\sigma r d\theta dr \quad (1.6)$$

Y sustituyendo la ecuación (1.6) en (1.2):

$$T = \int_0^a \int_0^{2\pi} \mu\sigma r^2 d\theta dr \quad (1.7)$$

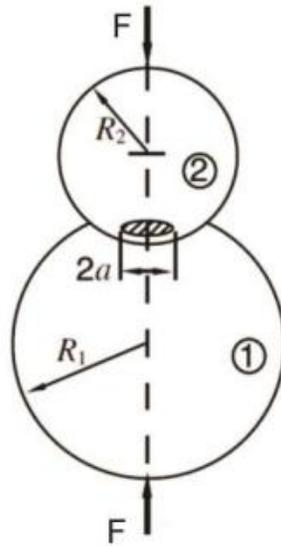
Donde  $a$  es el radio de contacto. Ahora se sustituye el esfuerzo promedio que se define como la carga normal entre el área de contacto:

$$T = \int_0^a \int_0^{2\pi} \mu \frac{N}{a_p^2} r^2 d\theta dr \quad (1.8)$$

Resolviendo las integrales se obtiene:

$$T = \frac{2\mu Na}{3} \quad (1.9)$$

Para continuar, hay que considerar la geometría con la que se genera el modelo de Hertz para contacto sobre una superficie que se muestra en la figura 1.4.



**Figura 1.4 Esquema a partir del cual se genera el modelo de Hertz de contacto sobre un punto**

Se establece que debido a la deformación elástica de las superficies, la zona de contacto se deforma en una geometría bidimensional de diámetro  $2a$ , donde:

$$a = \left( \frac{3FR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.10)$$

Donde  $R$  es el radio reducido, que para este caso será igual al radio del perno y  $E^*$  es el módulo elástico reducido que se calcula mediante la siguiente expresión.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (1.11)$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  son los módulos de elasticidad de los materiales en contacto, así como,  $\nu_1$  y  $\nu_2$  son las relaciones de Poisson de los mismos.

Sustituyendo (1.10) en (1.9), despejando el coeficiente de fricción  $\mu$  y sustituyendo  $F$  por  $N$ , queda:

$$\mu = \frac{3T}{2N} \left( \frac{3NR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.12)$$

Es importante mencionar que esta ecuación únicamente es válida en el rango elástico y por lo tanto no es aplicable para este estudio donde existe desgaste, es decir, deformación plástica. Es por esto que se utilizará la ecuación 1.9 para obtener el coeficiente de fricción, a partir de los tamaños aparentes de cada huella.

### **1.5.2 Perfilometría óptica**

Una técnica comúnmente utilizada para evaluar el desgaste en ensayos tribológicos es la perfilometría. Esta técnica provee amplia información acerca de la topografía de las superficies desgastadas [19], en particular brinda los principales parámetros de rugosidad: el promedio de las alturas en relación a una altura de referencia ( $R_a$ ), la media cuadrática de las alturas registradas ( $R_q$ ) y la rugosidad máxima que se refiere a la distancia entre el valle más profundo y la cresta más alta.

Aunque existen varias técnicas de perfilometría, para este trabajo la más relevante es la de perfilometría confocal (o microscopía confocal), que puede utilizar ya sea un láser u otra fuente de iluminación, así como diferentes técnicas de escaneo para obtener imágenes. Por su parte, la técnica confocal cromática utiliza una fuente de luz blanca (LED) que pasa a través de una serie de lentes (pluma cromática) con un alto grado de aberración cromática, lo que causa que cada longitud de onda proveniente de la luz blanca se centre a una distancia diferente de la pluma óptica. Un punto en la superficie estará enfocado cuando se encuentre dentro del rango de medición de una sola longitud de onda, mientras que todos los demás estarán fuera de foco. La luz blanca se refleja de vuelta a través de un filtro que permite únicamente el paso de la longitud de onda centrada a un espectrómetro que indicara la longitud de onda enfocada, lo que corresponde a la distancia del punto enfocado [20].

Se puede considerar que el proceso de escaneo en perfilometría en 3D se divide en dos: la traslación en la profundidad longitudinal ( $z$ ) y aquella en las direcciones transversales ( $x$ ,  $y$ ). Dichas traslaciones se pueden realizar ya sea moviendo la muestra y manteniendo el punto de enfoque fijo, o de manera inversa. Estos sistemas de escaneo son en gran medida los que permiten lograr alta resolución [21].

### 1.5.3 Microscopía electrónica de barrido

Para estudiar las propiedades fundamentales de los materiales se busca entender la relación que existe entre la síntesis, la estructura y las propiedades de los materiales. Para el fin mencionado, los microscopios electrónicos de barrido se han vuelto muy útiles y accesibles para gran parte de los investigadores en ciencias, ya que son sistemas amigables, con altos niveles de automatización de gran desempeño y que permiten visualizar los materiales a las escalas bajas ( $>10\ \mu\text{m}$ ).

El microscopio electrónico de barrido (MEB) posee una gran versatilidad gracias a sus diferentes modos de obtener imágenes, su excelente resolución espacial, la mínima preparación requerida en las muestras y su compatibilidad con técnicas de espectroscopía y difracción, además de ser capaces de lograr aumentos que van desde 5x hasta 1,000,000x [22].

Como su nombre lo indica, el MEB realiza un barrido o “escaneo” de la muestra mediante un haz de electrones que impacta a través de la superficie. Esta interacción genera radiación que es detectada, amplificada y usada para modular el brillo de un segundo rayo de electrones que es escaneado sincronizadamente a través de un tubo de rayos catódicos (hoy en día una pantalla de computadora) para generar una imagen [22].

Cuando el haz de electrones interactúa con una muestra se pueden generar varias señales (ver figura 1.5). Entre estas, existen tres tipos de electrones que pueden ser emitidas a partir de la penetración del haz en la superficie y que pueden ser utilizadas para generar imágenes o patrones de difracción útiles para su análisis mediante espectroscopía [22]:

- Electrones retrodispersados (BSE), con energías entre 50 eV y la energía del haz incidente, éstos son electrones incidentes que han sido dispersados en ángulos que se aproximan a los  $180^\circ$  dentro de la muestra y que consecuentemente la abandonan de nuevo [23].
- Electrones secundarios (SE), con energías entre 0 y 50 eV que debido a su baja energía, viajan distancias relativamente cortas en el espécimen (3-10 nm). Son generados como resultado de la irradiación de electrones incidentes. Las imágenes generadas mediante SE son las más comunes ya que son fáciles de recolectar,

proveen información acerca de la topografía de la superficie y son fáciles de interpretar [23]

- Electrones *Auger* producidos por la decaída de los átomos excitados y electrones retrodispersados que poseen energías cercanas a las de los electrones incidentes [22].

Además, debido a la excitación de los átomos con electrones primarios, se produce luz y rayos x, tanto característicos, como continuos. Estas señales pueden ser utilizadas para proveer información cualitativa, semicualitativa o cuantitativa acerca de los elementos o fases presentes en las regiones de interés [22].

También es posible obtener digitalmente señales de varios detectores, que pueden ser tratadas independientemente o ser combinadas al sumarlas, restarlas, multiplicarlas u otra manipulación matemática [22].

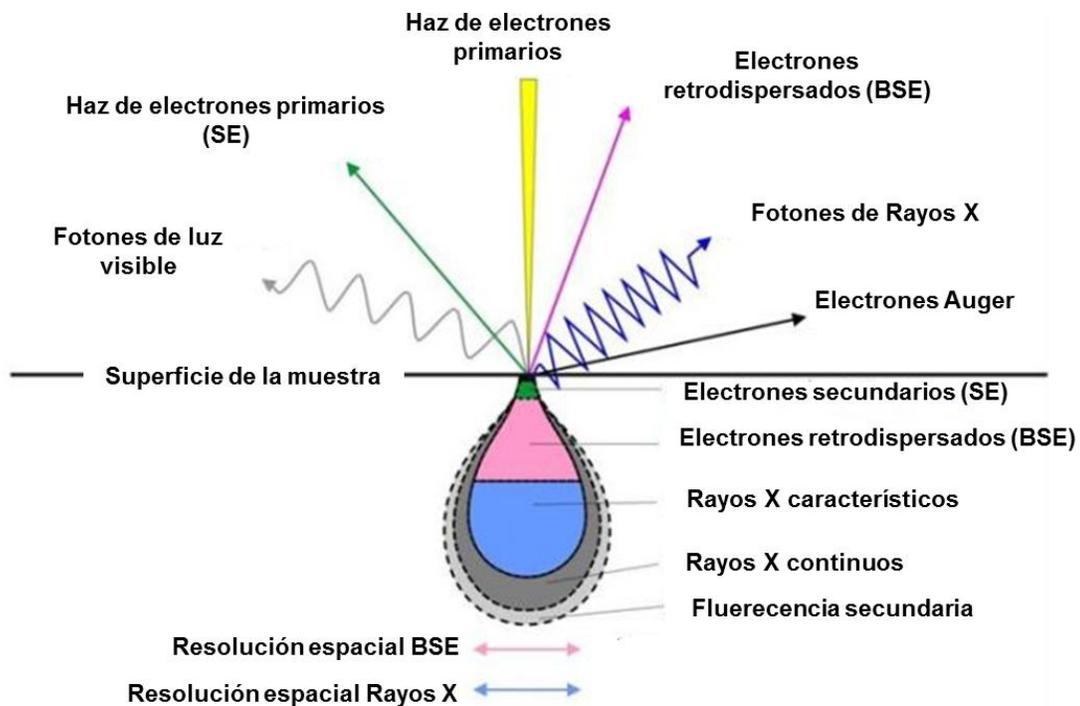


Figura 1.5 Señales generadas dentro de un MEB cuando un haz de electrones impacta una muestra, debajo de la superficie se muestran las zonas de interacción de cada tipo de electrones. [24]

### 1.5.4 Microscopía de fuerza atómica

Con el surgimiento de la microscopía fuerza atómica se revolucionó el análisis de superficies. Esta situación fue posible porque con este instrumento, es posible obtener visualizaciones de alta resolución de estructuras a escalas que van desde cientos de micrómetros hasta nanómetros.

En un microscopio de fuerza atómica (MFA) (Figura 1.6), se obtienen imágenes de superficies a partir de una sonda muy delgada que explora la muestra con la que hace contacto. La sonda es en realidad un cantiléver micro maquinado con una punta afilada en su extremo y es a partir de la medición precisa de los desplazamientos del cantiléver que se determina el nivel de interacción entre la punta y la muestra [22].

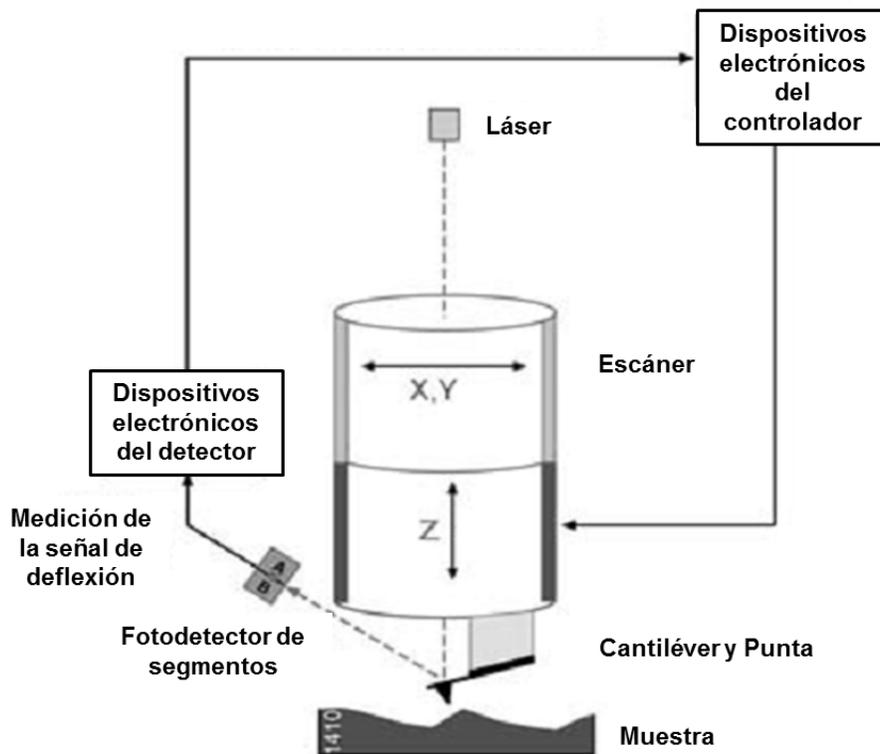


Figura 1.6 Esquema de componentes del MFA [22]

En la mayoría de los MFA se utiliza un rayo láser, que es desviado por el cantiléver, posteriormente se registra mediante un fotodetector posicional de 4 segmentos que mide las deflexiones normales y laterales a partir de la comparación entre la cantidad de luz que cada segmento recibe [22].

El MFA es utilizado para obtener la topografía en alta resolución de superficies, el estudio local de las propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas y térmicas, así como para el mapeo de la composición de muestras heterogéneas [22].

## Capítulo 2. Desarrollo experimental

### 2.1 Materiales

Inicialmente, se obtuvieron muestras de 2cm x 2cm de los materiales que aparecen en la tabla 2.1. Previo a este trabajo, los materiales fueron elaborados con anterioridad por fundición, se cortaron, laminaron y recocieron mediante tratamientos termomecánicos controlados. El número de muestras de cada material se estableció a partir de la disponibilidad de los mismos, tratando de obtener la mayor cantidad posible para realizar apropiadamente este estudio.

**Tabla 2.1 Materiales estudiados**

Material	No. de muestras
Al 1100 trabajado en frío ( $\epsilon_{VM}=3$ ), sin tratamiento térmico	5
Al 1100 trabajado en frío ( $\epsilon_{VM}=3$ ), con tratamiento térmico (300°C, 30')	10
SAE783 trabajado en frío ( $\epsilon_{VM}=3$ ), sin tratamiento térmico	8
SAE783 trabajado en frío ( $\epsilon_{VM}=3$ ), con tratamiento térmico (300°C, 30')	8

Los tratamientos térmicos son los definidos para obtener las propiedades mecánicas óptimas para el uso de la aleación SAE783 en cojinetes de deslizamiento de uso automotriz [25, 26]. Dichos tratamientos también se aplicaron en las muestras de aluminio para que sirvieran como material comparativo.

### 2.2 Preparación metalográfica

Con el objetivo de obtener muestras cuyas superficies fueran lo más lisas posible para llevar a cabo un mejor control de los experimentos, cada una de las placas fue preparada metalográficamente. Se trabajó con lijas de agua y se desbastaron los materiales progresivamente para lograr un acabado liso. Posteriormente, las muestras fueron pulidas con alúmina de 0.05  $\mu\text{m}$ .

## 2.3 Ensayo tribológico

Como se busca estudiar el desgaste, los materiales fueron sometidos a fricción bajo condiciones controladas en un ensayo tribológico.

Todos los ensayos se realizaron en un tribómetro coaxial diseñado y construido anteriormente en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) [27], un diagrama se muestra en la figura 2.1 con un perno de acero de 200 mm de radio de curvatura.

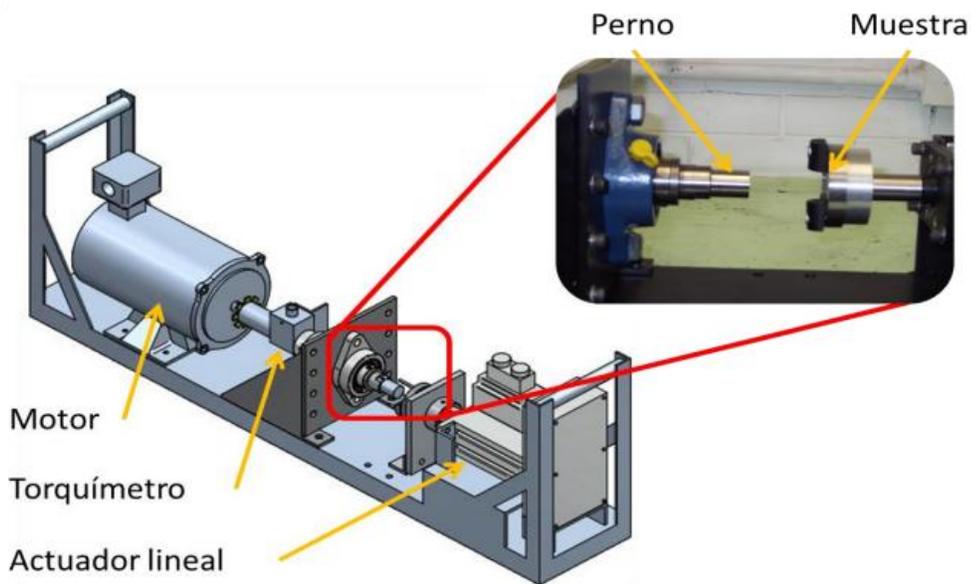


Figura 2.1 Esquema del tribómetro coaxial utilizado [27]

Se utilizaron los siguientes parámetros de velocidad angular ( $\omega$ ), carga aplicada (P) y tiempo (t) de ensayo.

Tabla 2.2 Parámetros utilizados para los ensayos

$\omega$ (rpm)	P(N)	t(s)
80	200	300

A lo largo de todo el tiempo de los ensayos se registraron datos de velocidad angular, torque y carga normal aplicada. La frecuencia de muestreo fue en todos los casos de 100 Hz, asegurando de esta manera contar con la cantidad necesaria de datos. Se utilizó el sistema de adquisición de datos *National Instruments®* a través del software *LabView®*.

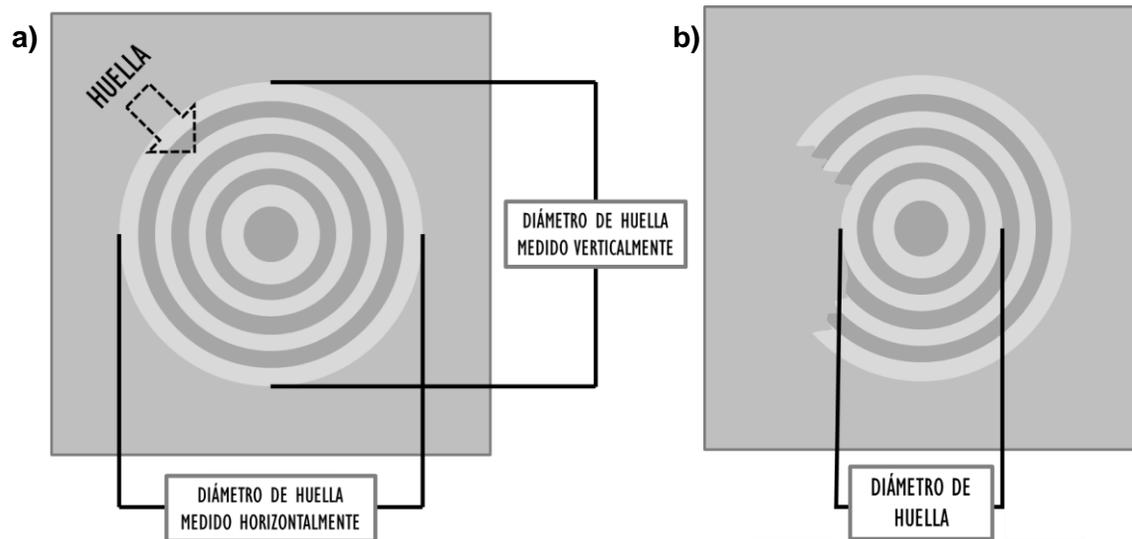
## 2.4 Visualización y caracterización de las superficies desgastadas

Para analizar el comportamiento de los materiales en los ensayos tribológicos se utilizaron diversos métodos de observación y caracterización, los cuales se describirán a detalle en las siguientes secciones.

### 2.4.1 Perfilometría óptica

Utilizando el microscopio óptico del perfilómetro se midieron los diámetros aproximados de las huellas generadas en el ensayo tribológico. Para esto se consideró que las huellas eran circunferencias perfectas y se obtuvo en cada caso el promedio de los diámetros medidos en dirección horizontal y vertical como se muestra en la figura 2.2a.

Ya que en algunos casos las huellas no tenían una forma claramente circular, se consideró que las huellas tenían el diámetro de la circunferencia completa de menor tamaño, como se muestra en la figura 2.2b.



**Figura 2.2 a) Medición de diámetros de las huellas b) Consideración para la medición de huellas incompletas.**

Posteriormente, mediante el software propio del perfilómetro, se obtuvieron las medidas de rugosidad de las superficies desgastadas durante el ensayo tribológico. Estas medidas son la rugosidad media ( $R_a$ ), la rugosidad máxima ( $R_{max}$ ) y la rugosidad media cuadrática ( $R_q$ ).

Con los datos de coordenadas obtenidos con el perfilómetro, se graficaron las superficies en tres dimensiones mediante el software *Mathematica*®. Estas gráficas resultan de gran utilidad cuando se requiere estudiar a detalle alguna zona en particular, sin embargo, el tiempo de procesamiento es muy largo debido a la gran cantidad de datos. Es por esto que únicamente se elaboraron gráficas de las muestras más representativas.

#### **2.4.2 Microscopía electrónica de barrido**

Como se mencionó en el capítulo anterior, el MEB es uno de los elementos más útiles para el análisis de los materiales sometidos a desgaste y se puede considerar la herramienta central de este estudio.

Se utilizó un MEB *Philips XL20*® con el que se observaron las zonas de desgaste, es decir, las huellas generadas en las muestras seleccionadas de cada material.

Se utilizaron tanto el detector de electrones retrodispersados como el de electrones secundarios. Al ser de mayor energía, el haz de electrones retrodispersados, proviene de una mayor profundidad del material y brinda información acerca de la composición del material que el de electrones secundarios, con el que se obtienen datos principalmente de la topografía.

#### **2.4.3 Microscopía de fuerza atómica**

Al igual que la perfilometría óptica, el MFA brinda información acerca de las superficies al punto que es considerado un tipo de perfilómetro en algunos casos, sin embargo, la diferencia principal entre ambos es que el microscopio es capaz de obtener información acerca de estructuras mucho más pequeñas del orden de nanómetros.

Se trabajó con un MFA *Bruker Innova*® en modo de contacto con un escáner de 90 µm para poder visualizar la estructura, a nivel nanométrico, de la aleación SAE783 con tratamiento térmico únicamente.

### **2.5 Obtención de los coeficientes de fricción**

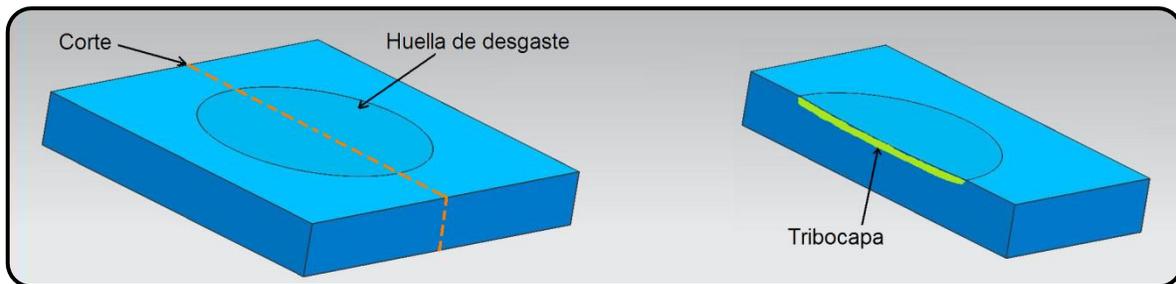
A partir de los datos obtenidos en los ensayos tribológicos y los diámetros de las huellas medidos con el microscopio óptico, se se calcularon los coeficientes de fricción a

lo largo del tiempo de los ensayos de cada una de las muestras a través de la ecuación 1.9.

El coeficiente de fricción es de suma importancia para estudiar la compatibilidad tribológica de un par de materiales en contacto y movimiento relativo entre sí, sin embargo en el caso de los cojinetes de deslizamiento para uso automotriz siempre existe lubricación de por medio con lo que se reduce el desgaste (en menor medida durante el arranque del motor). No obstante, en este trabajo se consideró de importancia obtener dichos coeficientes para comparar entre el material tribológico (SAE783) y el material de referencia (Al 1100), obteniendo de esta manera más información al respecto de dichos materiales.

## 2.6 Visualización y caracterización de las tribocapas

Para poder visualizar las TC en los materiales, fue necesario realizar un corte transversal justo a través del centro de la huella de una muestra de cada material ensayado, de tal forma que la TC estuviera expuesta. Ver figura 2.3.



**Figura 2.3 Diagrama de seccionamiento de las muestras**

A continuación se montaron las probetas en baquelita para ser utilizadas adecuadamente en el MEB. Finalmente se prepararon metalográficamente las caras expuestas mediante el mismo procedimiento establecido en la sección 2.2.

Las probetas fueron observadas una vez más en el MEB enfocándose en la TC. Como las muestras habían sido preparadas metalográficamente por lo que eran planas, únicamente se trabajó con el BSE.

A partir de las imágenes obtenidas se midieron las dimensiones de las capas generadas y se estudiaron las características y el comportamiento de los materiales durante el desgaste.

## Capítulo 3. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del desarrollo experimental descrito en el capítulo 2. Al igual que la metodología, los resultados pueden agruparse en tres apartados, los obtenidos durante los ensayos, el análisis de la superficie desgastada por acción tribológica y el análisis de la TC que se logró posteriormente al seccionamiento de las muestras ensayadas.

### 3.1 Ensayo tribológico

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran las gráficas comparativas de carga y torque durante los ensayos. Para esto se requirió multiplicar los valores de torque obtenidos en los ensayos por un factor de conversión reportado durante la etapa de diseño del tribómetro [27].

Se observa que para el Al y en particular en las muestras STT, existió una mayor fluctuación de carga durante los ensayos, mientras que para las muestras de SAE783, se alcanzó un valor prácticamente constante a la mitad de los ensayos aproximadamente. El torque, por otro lado, brinda información acerca de la resistencia al desgaste de cada material. Es claro que las muestras de Al, no sólo alcanzaron valores mayores de torque durante los ensayos, sino que además no logran estabilizarse por completo y sufrieron mayores fluctuaciones de este valor también. Esto fue visible durante los ensayos, ya que en todas las muestras de Al el perno se detuvo por algunos segundos por la fuerza de fricción involucrada, mientras que en las de SAE783, el movimiento se dio sin complicaciones.

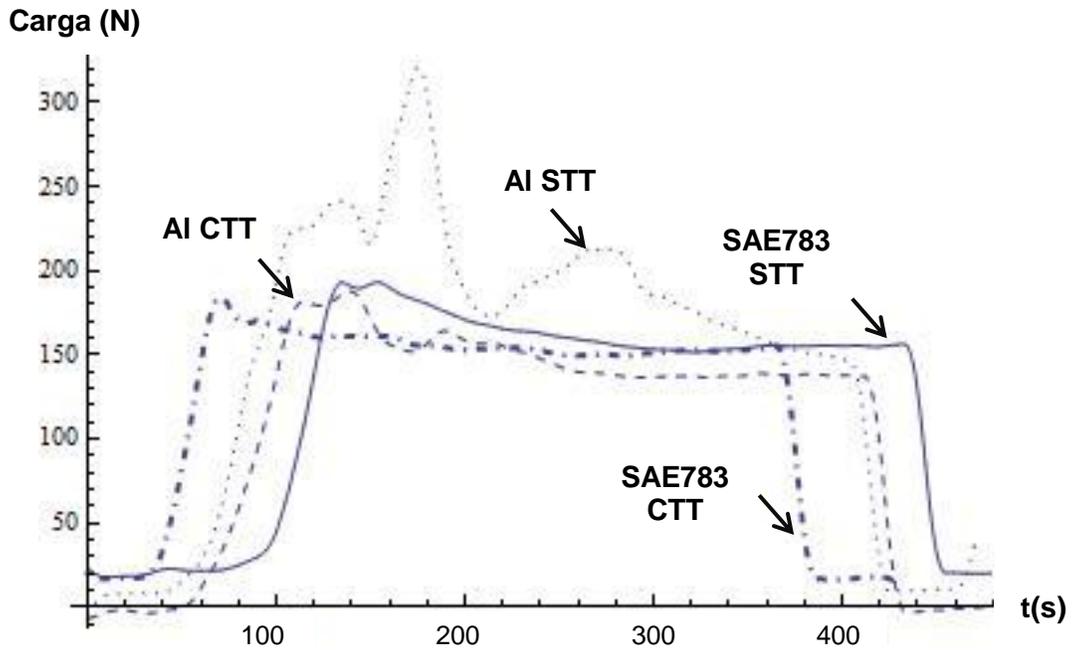


Figura 3.1 Variación de la carga durante los ensayos tribológicos de los cuatro materiales.

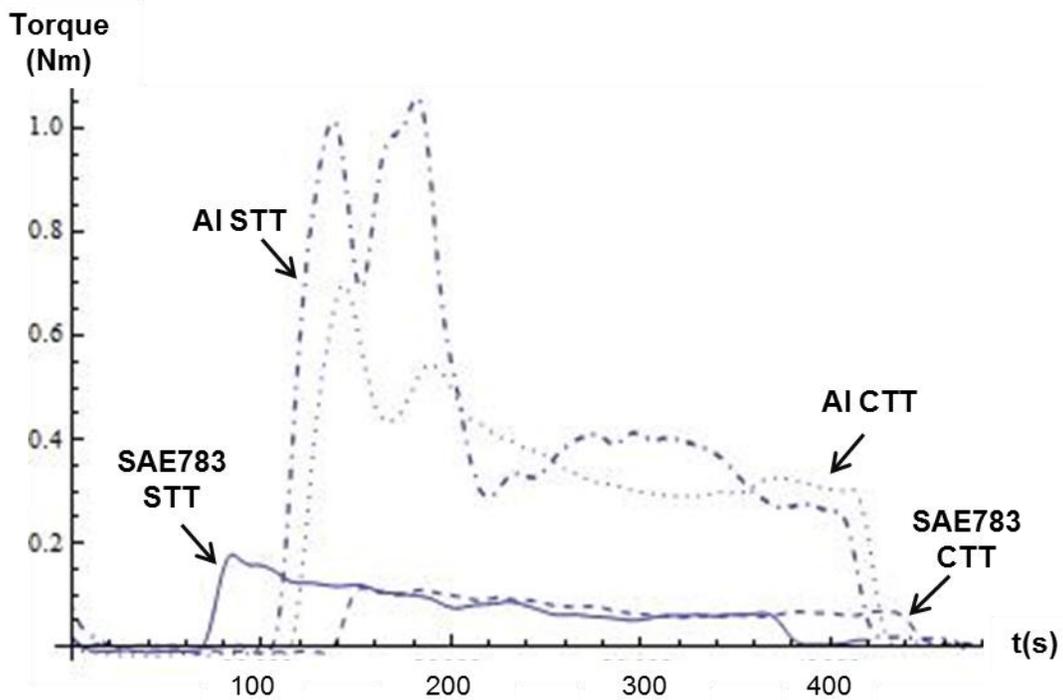


Figura 3.2 Variación del torque durante los ensayos tribológicos de los cuatro materiales.

## 3.2 Visualización y caracterización de las superficies desgastadas

### 3.2.1 Perfilometría óptica

En la tabla 3.1 se muestran los valores de los diámetros medidos, tanto en dirección horizontal como en dirección vertical, así como el valor promedio calculado a partir de éstos y la desviación estándar del mismo.

**Tabla 3.1 Diámetros medidos para cada huella**

Material	No. de muestra	Diámetro medido en dirección horizontal [mm]	Diámetro medido en dirección vertical (mm)	Diámetro promedio (mm)	Desviación Estándar
Al 1100 trabajado en frío STT	1	11.453	11.242	11.28698	1.083813
	2	12.912	13.133		
	3	10.536	10.784		
	4	10.0854	10.32705		
	5	11.0257	10.94885		
Al 1100 trabajado en frío CTT	1	4.538	4.284	7.919206	2.054955
	2	9.2483	9.1235		
	3	8.142	8.2409		
	4	10.9484	11.00805		
	5	5.5204	5.71075		
	6	6.3684	6.4586		
	7	Fallido	Fallido		
	8	9.1067	8.98525		
	9	8.8556	8.66595		
	10	9.2325	8.79585		
SAE783 trabajado en frío STT	1	2.7485	2.6874	2.054944	0.337073
	2	2.0677	2.0994		
	3	1.9485	2.00955		
	4	1.5579	1.56715		
	5	1.817	1.8653		
	6	1.7823	1.84715		
	7	1.9931	2.03685		
	8	2.2665	2.32675		
SAE783 trabajado en frío CTT	1	1.8883	1.95455	1.81565	0.314828
	2	2.1211	2.1131		
	3	1.7834	1.76495		
	4	1.591	1.65845		
	5	1.1969	1.23765		
	6	2.2582	2.164		
	7	1.5743	1.58895		
	8	2.1618	2.04355		

Las muestras de la aleación SAE783 son las que presentan diámetros menores, ya que forman un mejor par tribológico con el acero que las de Al1100, es decir, que generan menos desgaste ante la fricción con el perno.

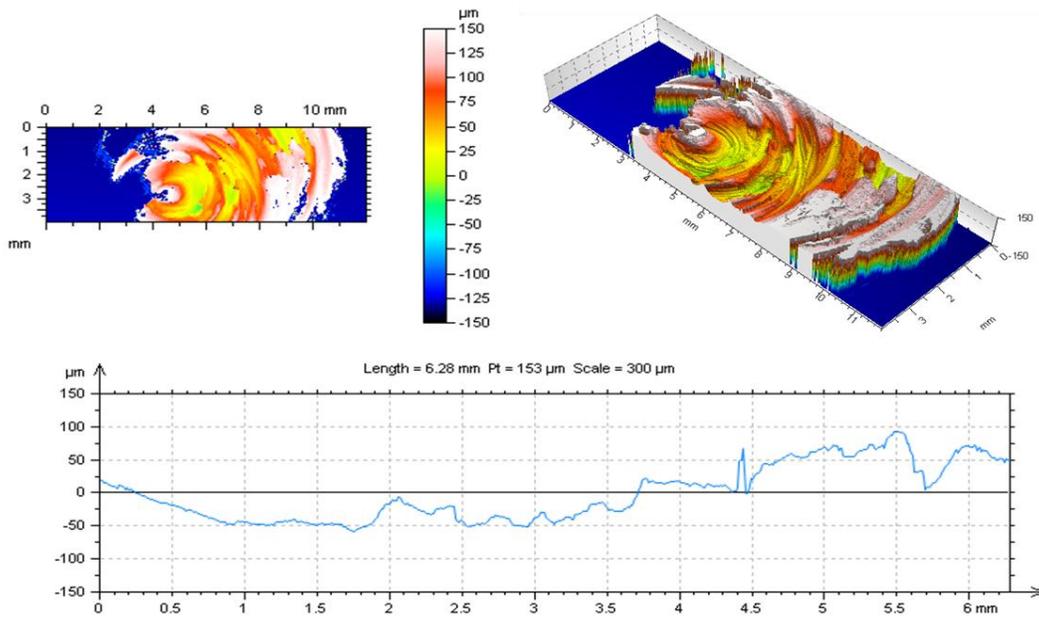
El software del propio perfilómetro óptico proporciona imágenes en dos y tres dimensiones, que representan las diferentes alturas de los puntos que conforman la superficie mediante colores, así también, muestra los perfiles de alturas y los valores de rugosidad más importantes que son la rugosidad máxima ( $R_{max}$ ), la rugosidad media ( $R_a$ ) y la rugosidad media cuadrática ( $R_q$ ).

En la tabla 3.2 se encuentran los valores de rugosidad mencionados para cada material, por otra parte, en las figuras 3.3 y 3.4 se presentan las imágenes obtenidas para las muestras de Al1100 y en las figuras 3.5 y 3.6 las correspondientes a la aleación SAE783.

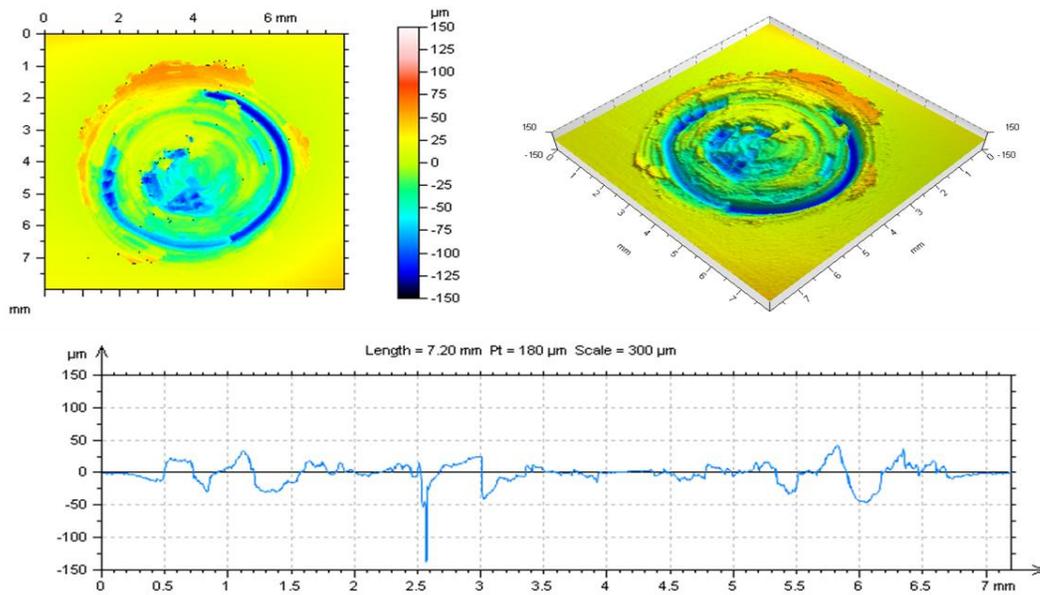
**Tabla 3.2 Valores de rugosidad para cada material**

Material	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_q$ ( $\mu\text{m}$ )
Al 1100 trabajado en frio, sin tratamiento térmico	8.89	142	13
Al 1100 trabajado en frio con tratamiento térmico	6.23	49.2	9.03
SAE783 trabajado en frio sin tratamiento térmico	3.46	20.3	4.16
SAE783 trabajado en frio con tratamiento térmico	2.11	12	2.81

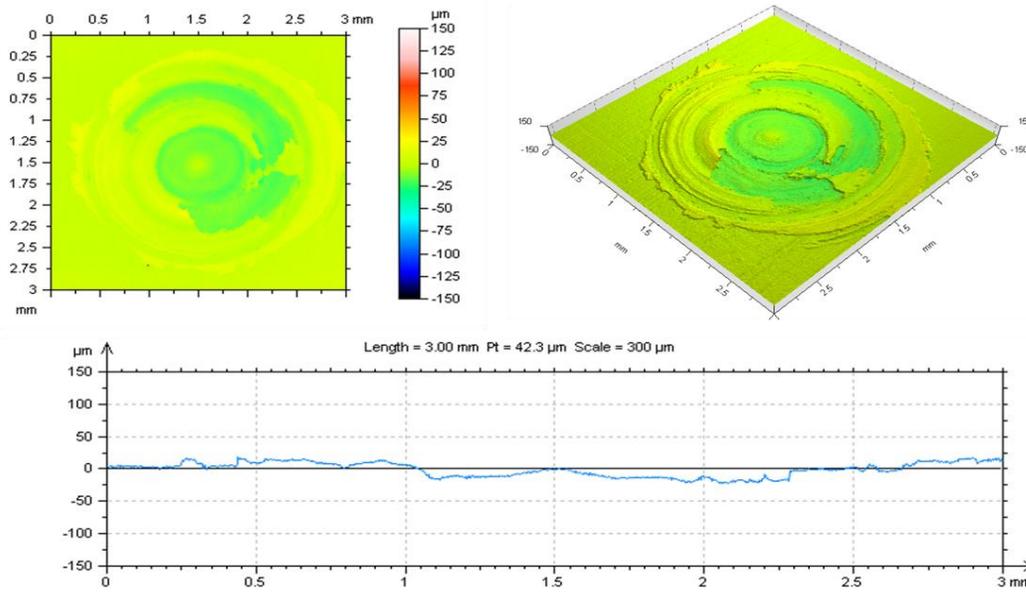
Como era de suponerse, las superficies generadas en las muestras de SAE783 poseen menor rugosidad que las de Al. De igual manera, aquellas CTT sufrieron menor desgaste que las de misma composición STT.



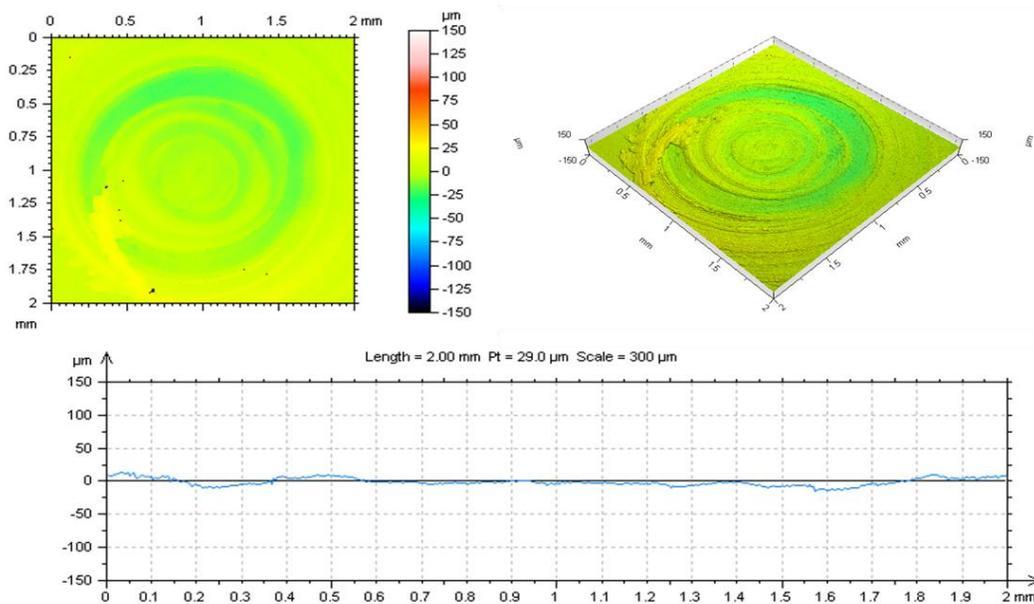
**Figura 3.3** Rugosimetría de muestra de Al 1100 STT. Al ser tan amplia la huella, se delimitó la zona del escaneo, por lo que no se muestra la huella completa. Algunos de los surcos generados durante el ensayo son más profundos que el rango del perfilómetro, por lo que se truncó el perfil.



**Figura 3.4** Rugosimetría de muestra de Al 1100 CTT. Se aprecian grandes surcos representados en color azul oscuro y como valles en el perfil de rugosidad.



**Figura 3.5** Rugosimetría de muestra de SAE783 STT. Se distinguen únicamente zonas amarillas y verdes, así como un perfil de rugosidad de poca amplitud a comparación de las muestras de Al 1100.

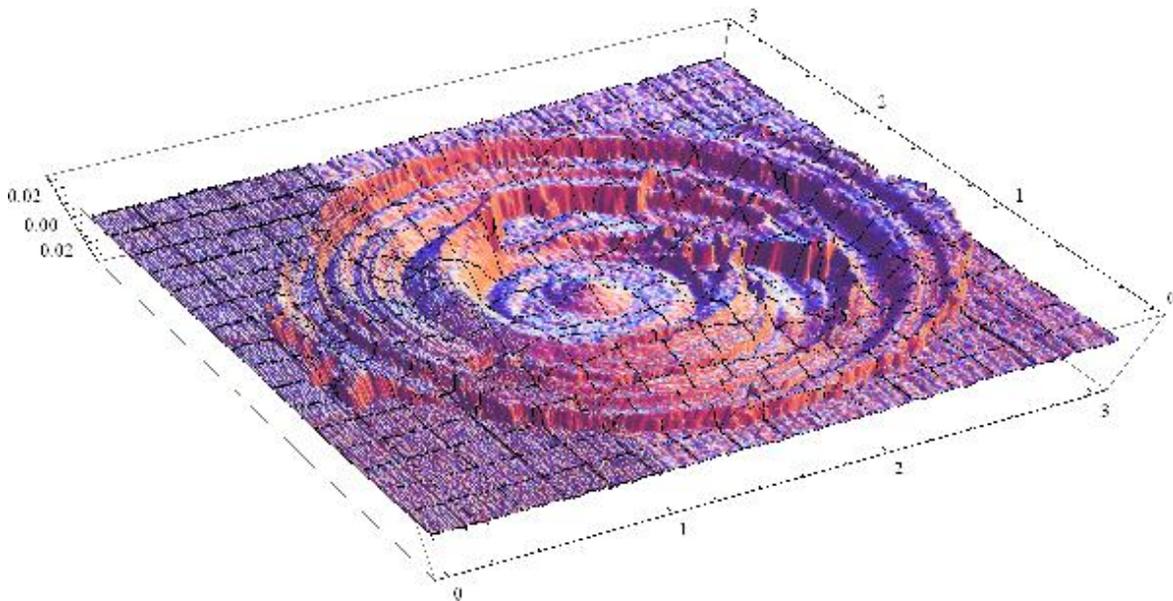


**Figura 3.6** Rugosimetría de muestra de SAE783 CTT. Según los colores mostrados, existen variaciones de hasta 50  $\mu\text{m}$  en la superficie. También se aprecia una huella de menor tamaño y de mayor amplitud de pico a pico que la muestra de SAE783 STT.

La gran diversidad de colores en las imágenes de Al 1100, a comparación de los que se muestran en las de la aleación SAE783, son evidencia de que el desgaste es mucho más severo en las primeras. Esto se puede corroborar en primera instancia al comparar los perfiles, que al estar bajo la misma escala en el eje y, es decir, el de la altura, son claramente muy diferentes. En este sentido, se puede decir que en las muestras de Al se generaron huellas más rugosas que las de la aleación. Por su parte, basta con comparar los valores de rugosidad para obtener otra prueba determinante de este fenómeno.

A partir de la comparación de los datos e imágenes se corrobora que los materiales CTT no sólo generaron huellas de menor tamaño, sino que también sufrieron menor deformación plástica (desgaste). Lo mencionado es evidencia de que poseen mayor resistencia al desgaste con el acero que aquellos STT.

En la imagen de la figura 3.7 se aprecia la gráfica de la huella completa generadas mediante el software *Mathematica*® de una de las muestras más significativas de la aleación SAE783 tratada térmicamente.



**Figura 3.7 Superficie graficada mediante *Mathematica*® con los datos obtenidos con el perfilómetro.**

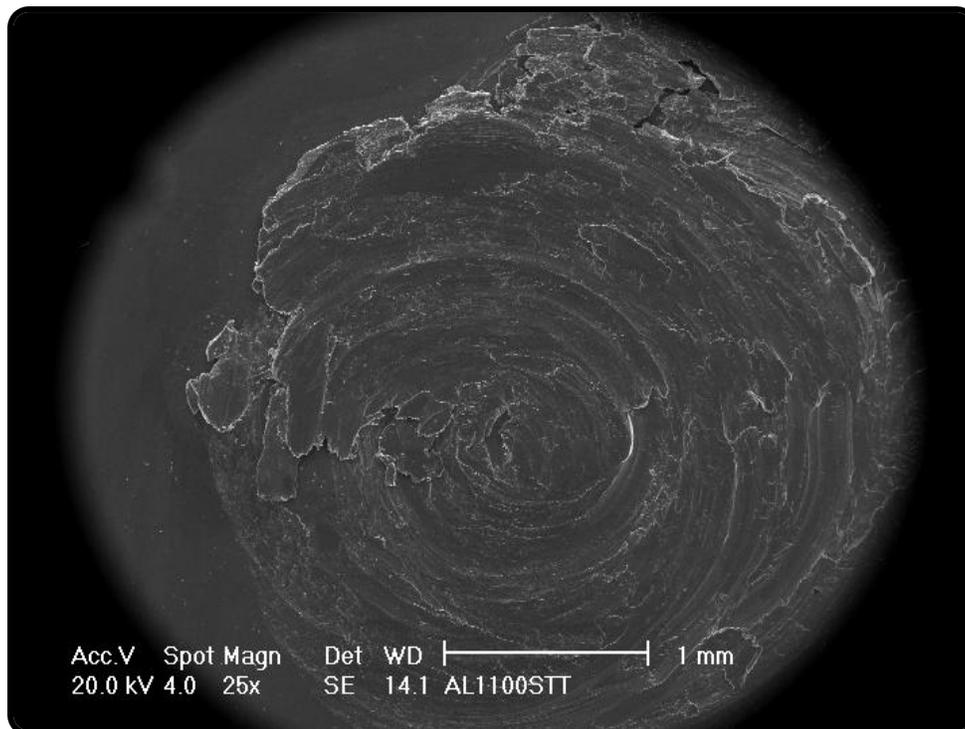
Aparte de que este tipo de gráficas permiten realizar una caracterización de zonas específicas de las superficies, la principal utilidad de la información obtenida con el perfilómetro es que facilita analizar los datos mediante modelos y simulaciones por computadora.

### 3.2.2 Microscopía electrónica de barrido

En esta sección se presentan y analizan micrografías de las superficies desgastadas de cada uno de los materiales. Se trata de imágenes de las zonas deformadas plásticamente por el perno de acero durante el ensayo tribológico.

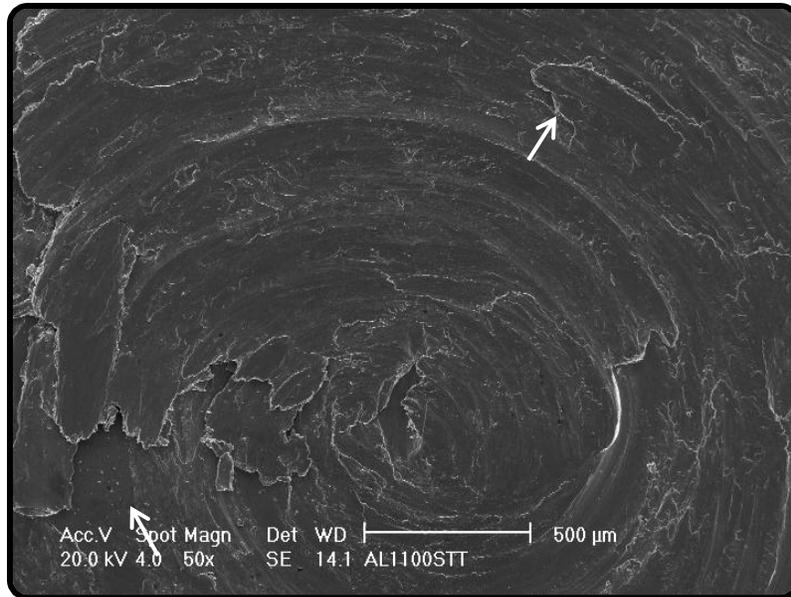
#### Al 1100 STT

Como las huellas de Al son las de mayor tamaño, no fue posible observarlas en su totalidad, sin embargo es posible distinguir las zonas centrales y más representativas. En ellas se encuentran las zonas de deformación plástica severa generadas durante los ensayos tribológicos. Ver figura 3.8.



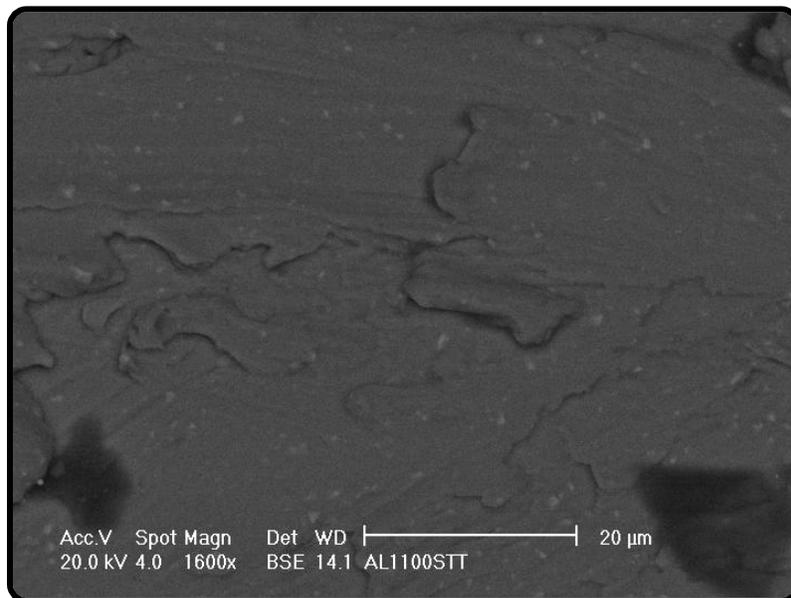
**Figura 3.8 Micrografía con detector SE, el material se ha deformado plásticamente debido a la acción tribológica.**

En la figura 3.9 se observan las formas de material desplazado características del desgaste adhesivo en la dirección de giro. El mismo comportamiento se observa a diferentes escalas.



**Figura 3.9 SE, se aprecia desgaste adhesivo.**

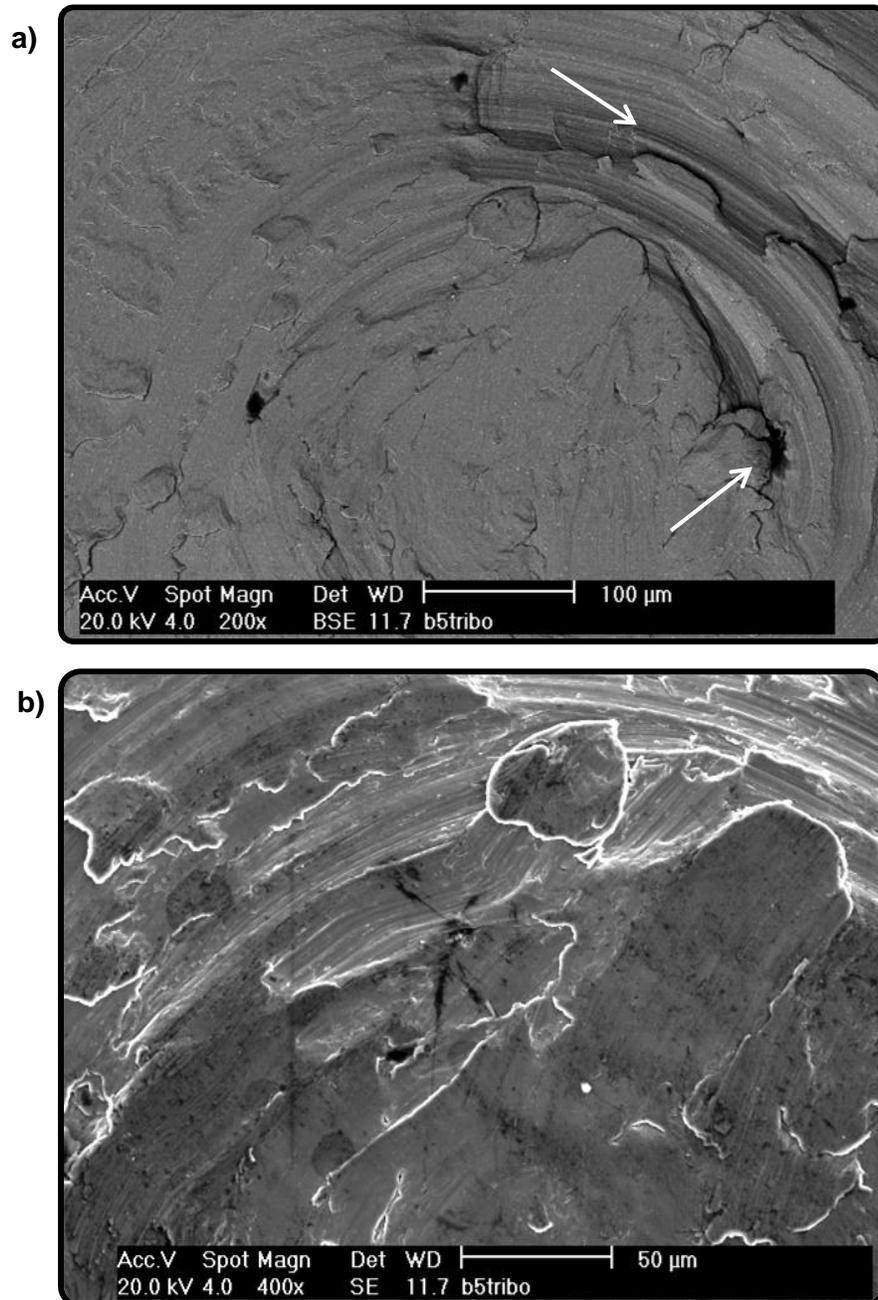
La imagen de la figura 3.10 fue obtenida con el detector de electrones retrodispersados y permite observar partículas de un gris más claro que son precipitados intermetálicos.



**Figura 3.10 BSE, presencia de precipitados de  $Al_3Fe$ .**

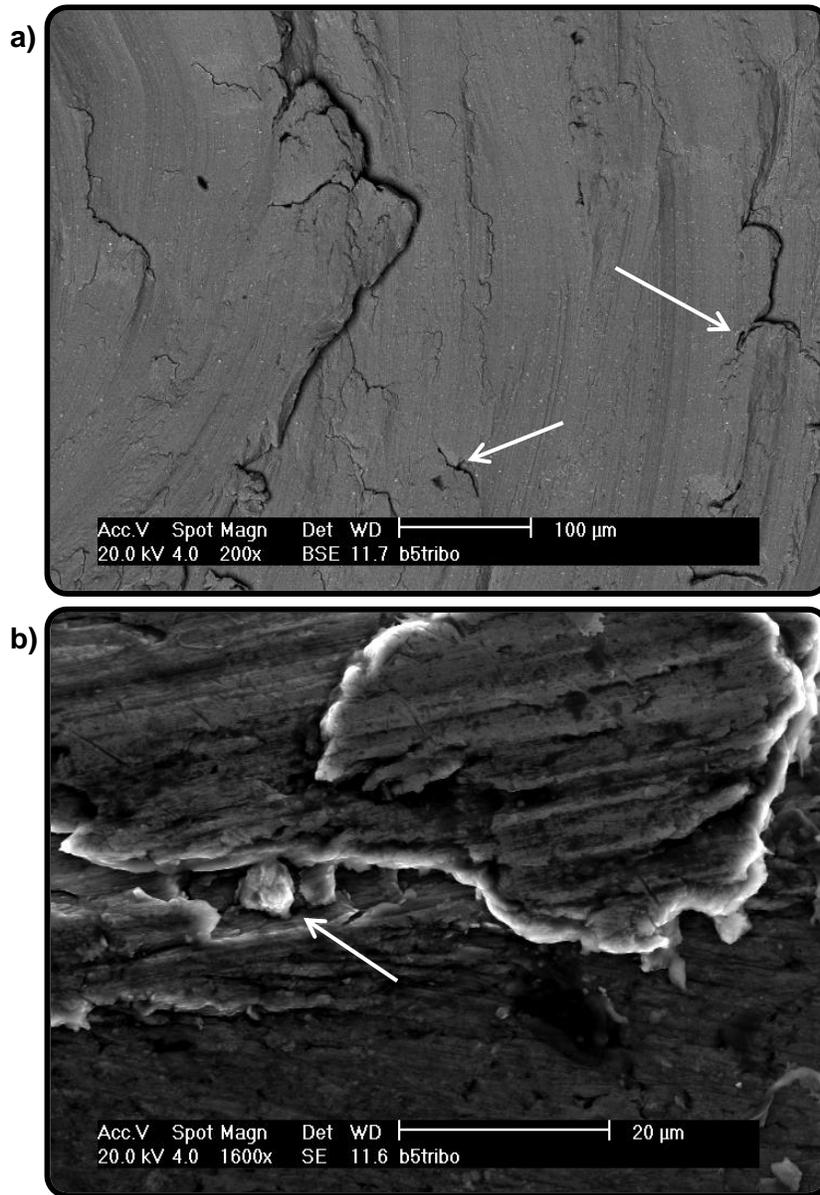
## Al 1100 CTT

En el Al CTT se observan prácticamente las mismas características mencionadas para el material de la sección anterior. De igual manera existen manifestaciones de desgaste severo, evidentes por la gran deformación plástica presente en los surcos y volúmenes desplazados relativamente grandes. Ver figura 3.11.



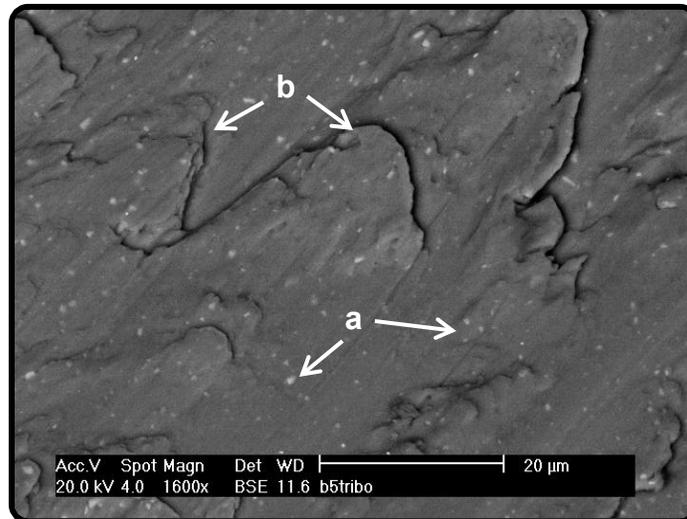
**Figura 3.11 Señales de desgaste, se aprecian grandes surcos y volúmenes desplazados. a) BSE. b) SE.**

Se observan también zonas agrietadas del material (figura 3.12a), así como material desprendido (figura 3.12b).



**Figura 3.12 a) BSE, material agrietado b) SE, material desprendido.**

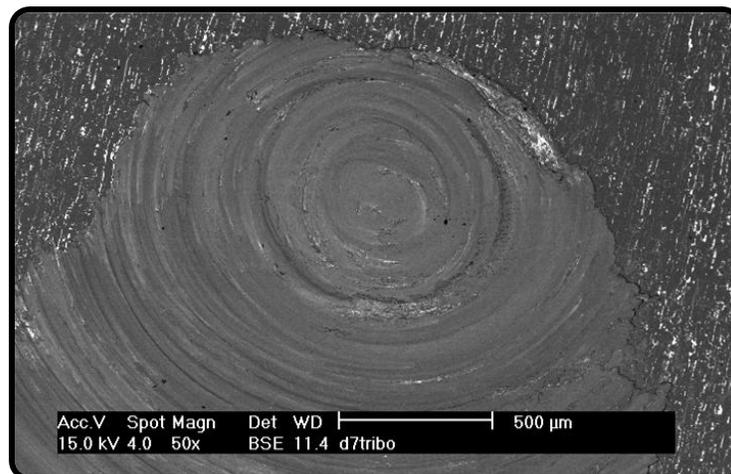
En la imagen siguiente (figura 3.13), a 1600 aumentos, se aprecian los precipitados intermetálicos, además de que se distinguen señales de desgaste adhesivo a menores escalas.



**Figura 3.13 BSE, precipitados intermetálicos nanométricos (a) en el material y señales de desgaste adhesivo a escalas micrométricas (b).**

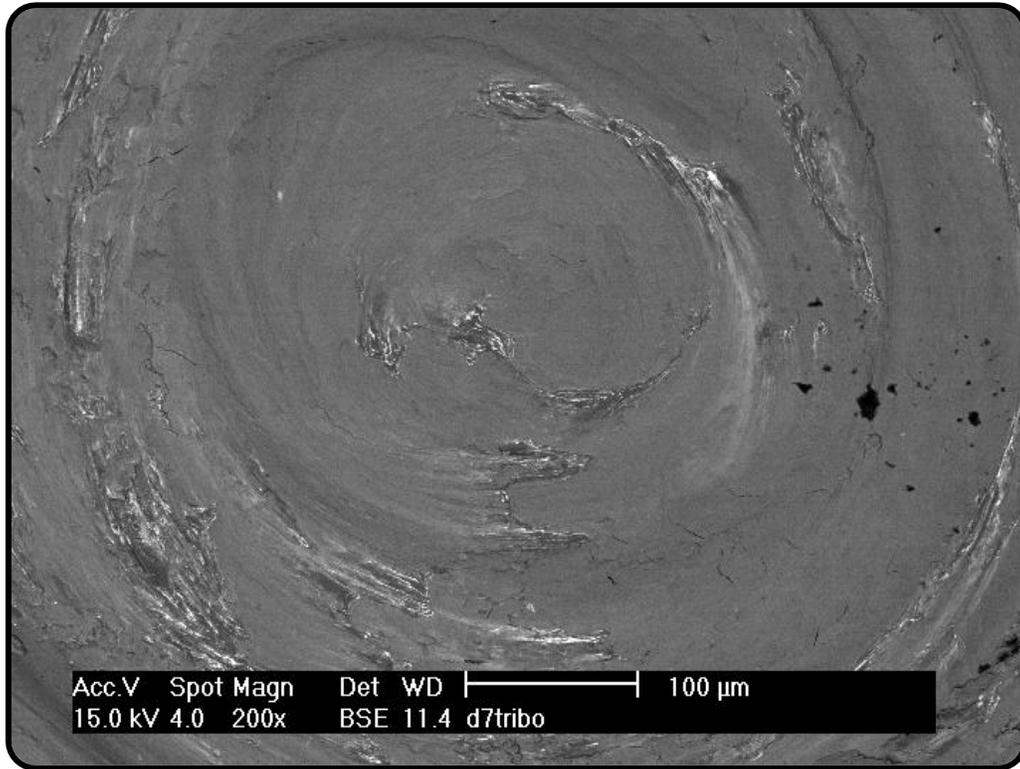
### **SAE783 STT**

A primera vista (figura 3.14), se distingue entre la estructura original donde existen listones de estaño alargados inmersos en una matriz de aluminio y la zona desgastada donde los materiales se han mezclado, generando una nueva fase. Se distinguen surcos que describen trayectorias circulares cerradas, a diferencia de las muestras de Al donde existían grandes volúmenes de material desplazado por el desgaste adhesivo que las interrumpían, esto significa que existe mayor compatibilidad tribológica de este material con el acero.



**Figura 3.14 BSE, se distingue la zona de mezcla mecánica (MM) de la estructura original con listones de estaño alargados.**

En esta ocasión, el centro de la huella presenta desgaste mucho menos severo que en las muestras de Al 1100, aunque también existen zonas de mezcla incompleta donde los listones de estaño fluyeron con el resto del material. Ver figura 3.15



**Figura 3.15 BSE, gran parte del centro de la huella se ha mezclado homogéneamente.**

En la dirección de giro se observan patrones de grietas características del desgaste adhesivo como se muestra en la figura 3.16. También se encuentran agrietamientos que generan un efecto de triturado en aquellas zonas de MM incompleta y que se encuentran alejadas del centro de la huella. En la figura 3.17 se aprecian dichas zonas donde el material comenzó a fluir y a mezclarse durante el ensayo, aunque en menor medida que en otras áreas cercanas al centro de la huella.

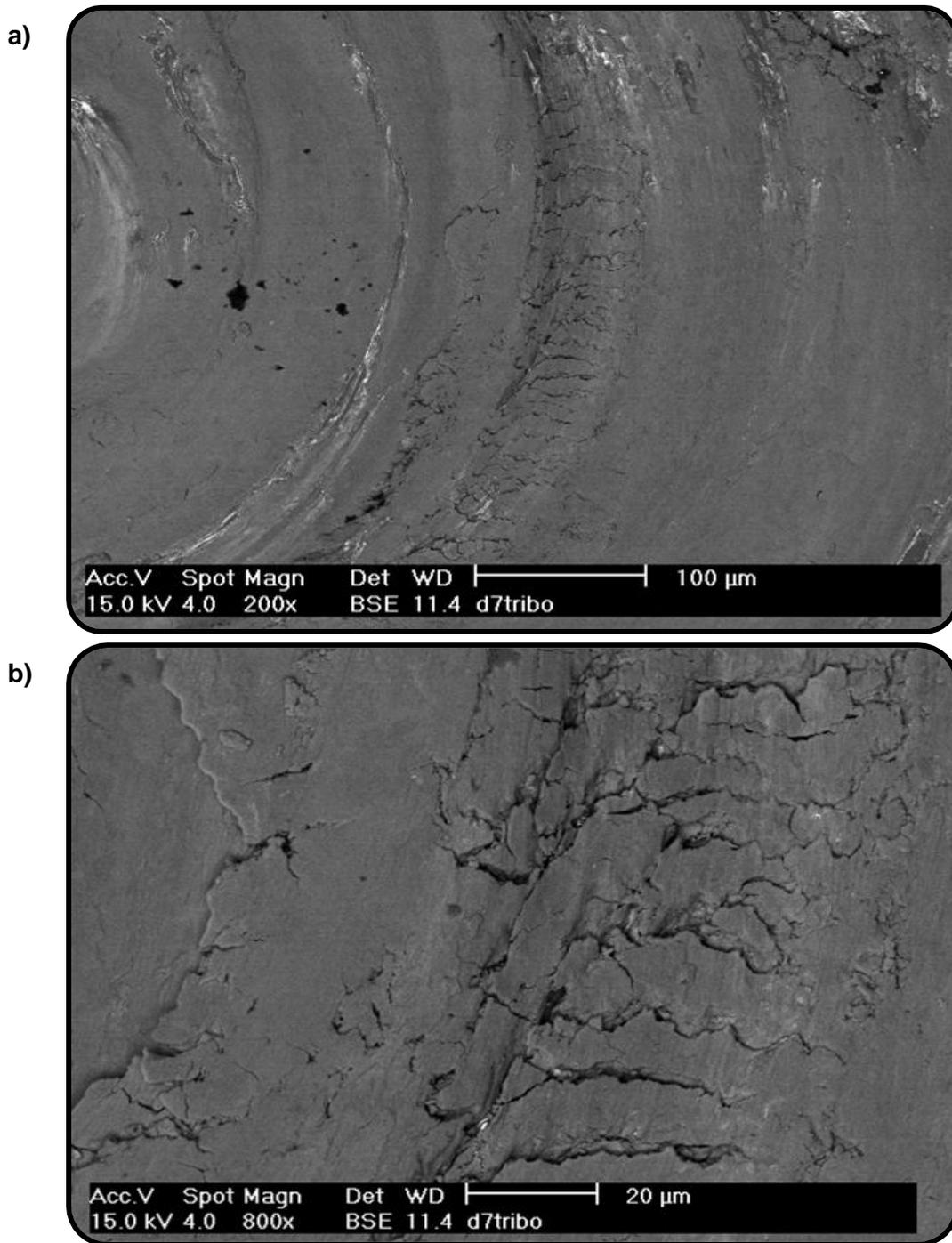
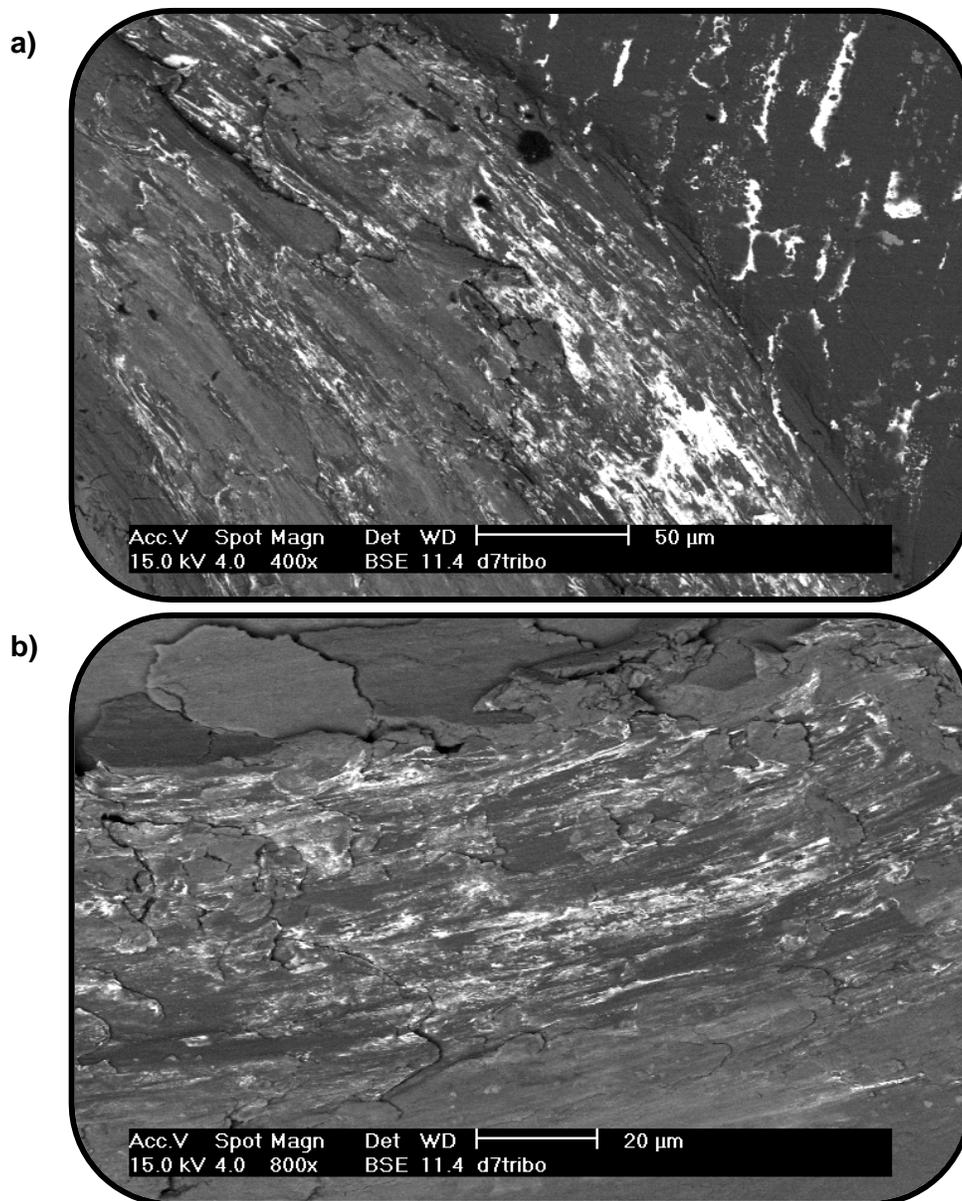


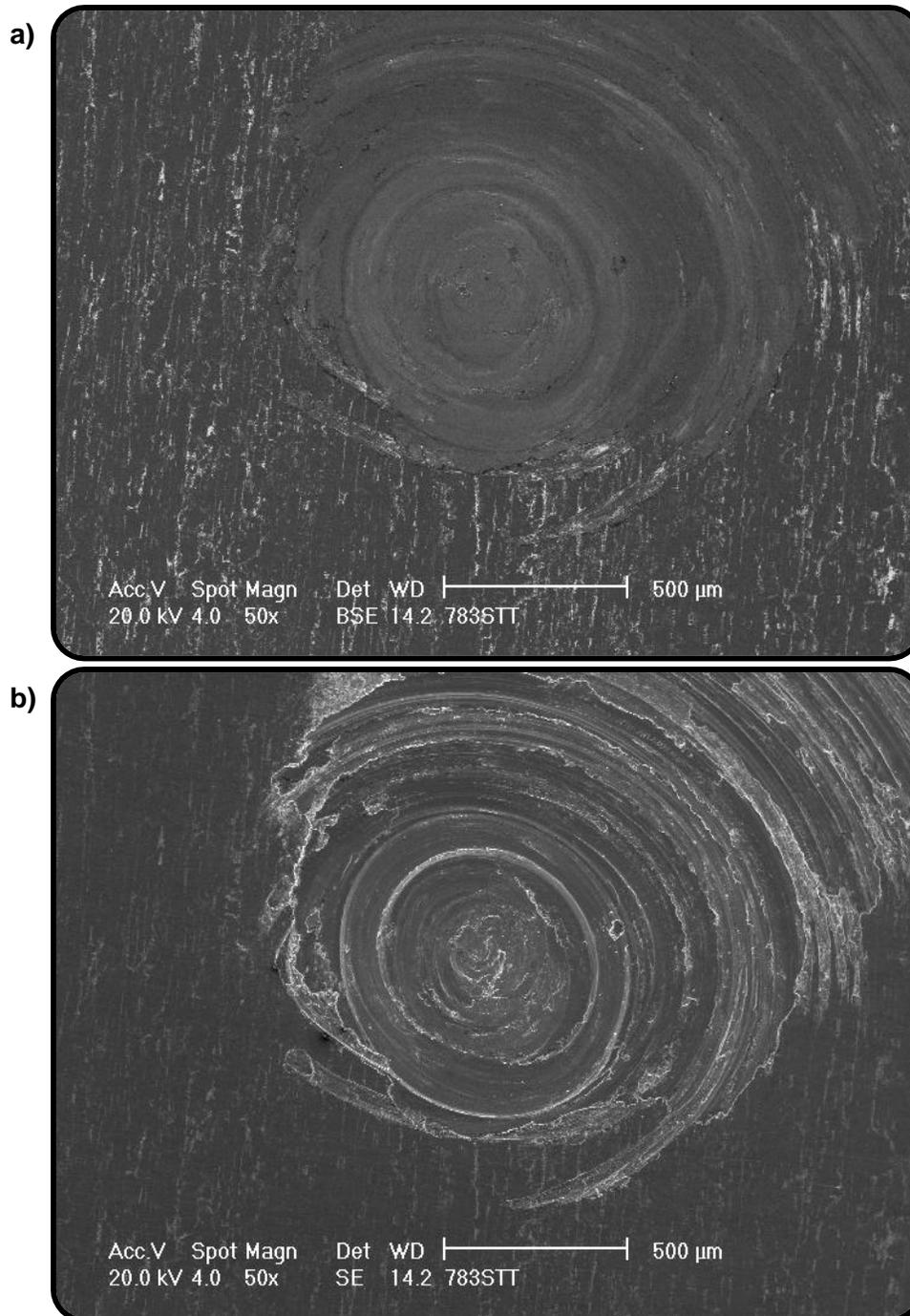
Figura 3.16 Agrietamiento característico de desgaste adhesivo. a) BSE, patrón generado por el desgaste adhesivo. b) BSE, volúmenes micrométricos de material desplazado.



**Figura 3.17 Zonas de MM incompleta a) BSE, se aprecia el flujo del material en comparación con la estructura original. b) BSE, presencia de grietas generadas por el desgaste adhesivo.**

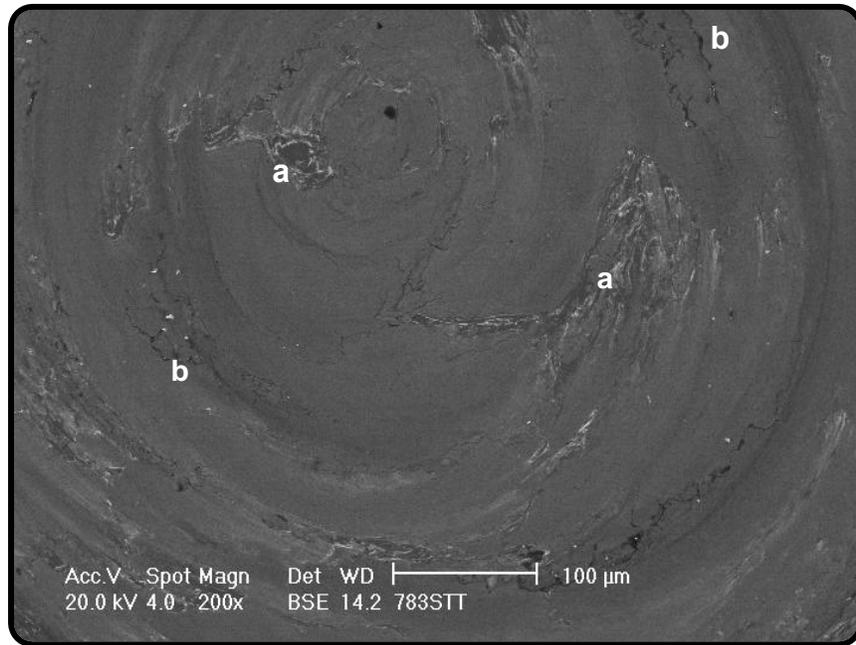
### **SAE783 CTT**

Como se mencionó, existen superficies homogéneas de MM que contrastan con el material sin desgastar, la figura 3.18a hace referencia a lo mencionado, pues afuera de la huella son claros los listones de estaño que se orientaron durante el laminado, también se aprecia la zona de MM así como un desgaste aparentemente más homogéneo que en las muestras de Al 1100. La imagen del haz de electrones secundarios (figura 3.18b) corrobora esto, pues se distinguen patrones ovalados completos.



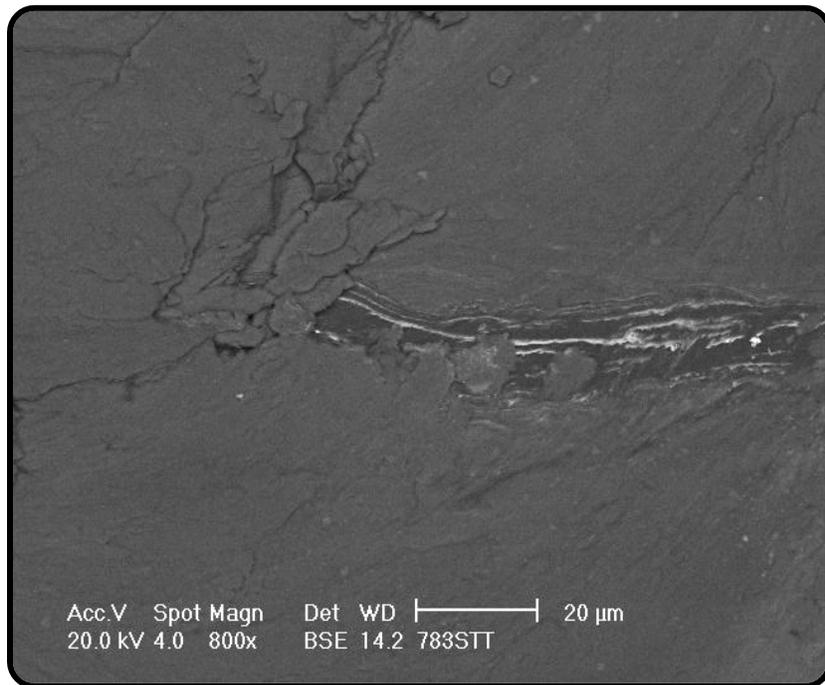
**Figura 3.18 Mezcla y desgaste más homogéneo que en las muestras de Al1100. a) BSE. b) SE**

A pesar de la deformación plástica que existe, se evidencia la existencia de grandes zonas de MM incompleta en los límites de la huella y cerca del centro de la misma (figura 3.19). También se detectan zonas relativamente pequeñas de agrietamiento.



**Figura 3.19 BSE, varias zonas de MM incompleta (a) y de agrietamiento (b).**

La composición de la mayor parte de la huella aparentemente es homogénea, sin embargo en donde no se completó la mezcla, los listones de estaño aún existen pero su dirección no es la de laminado, pues han fluido durante los ensayos como se muestra claramente en la figura 3.20.



**Figura 3.20 BSE, zona de MM incompleta**

En los límites de la huella se encuentran zonas donde el material mezclado se encuentra fragmentado en pequeñas partes asemejando un proceso de trituración. Ver figura 3.21.

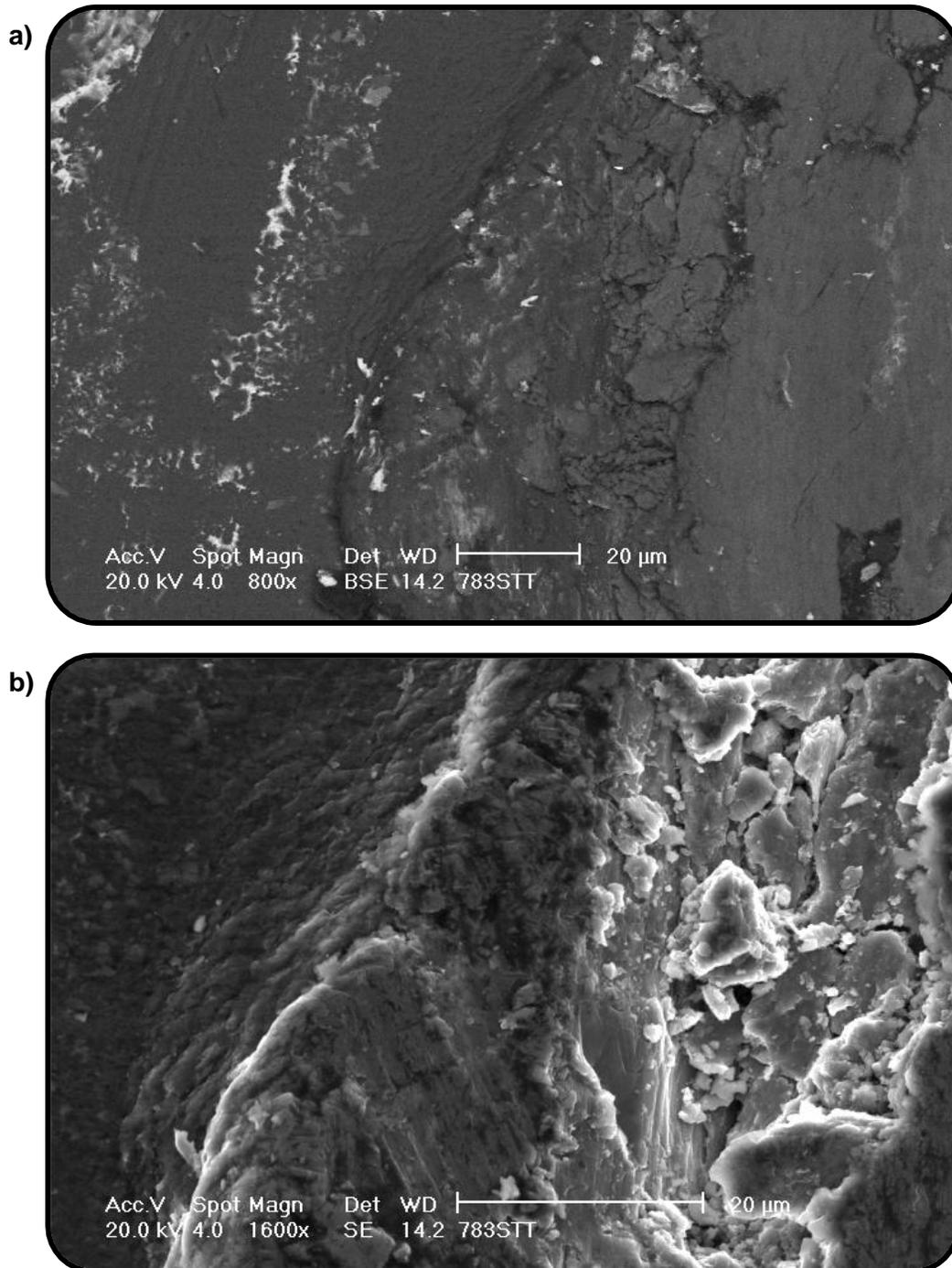


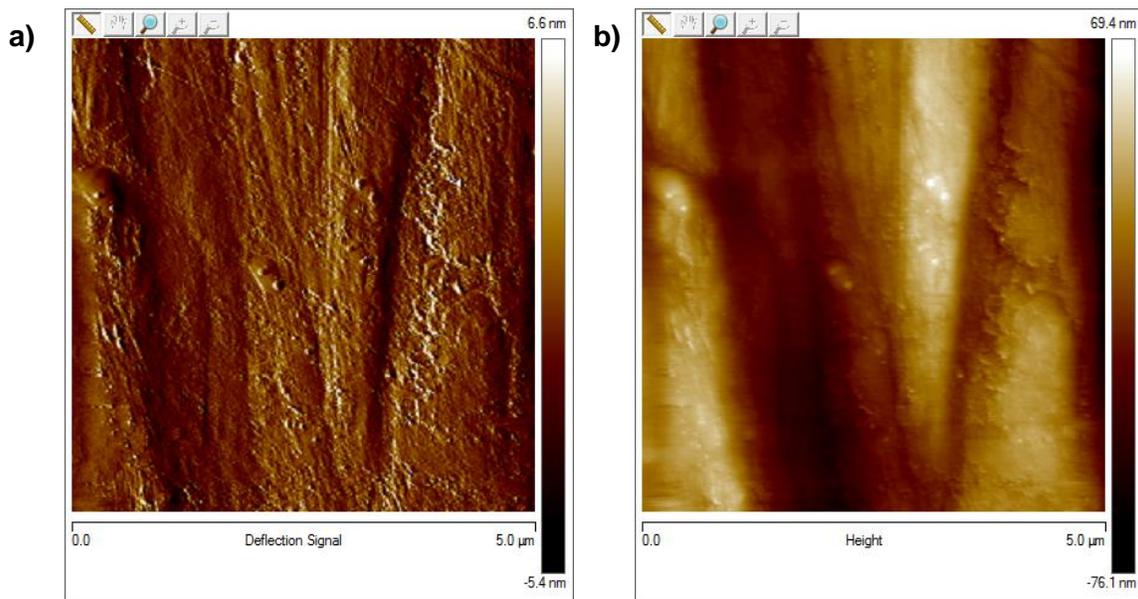
Figura 3.21 Material agrietado y separado en los límites de la huella. a) BSE. b) SE.

### 3.2.3 Microscopía de fuerza atómica

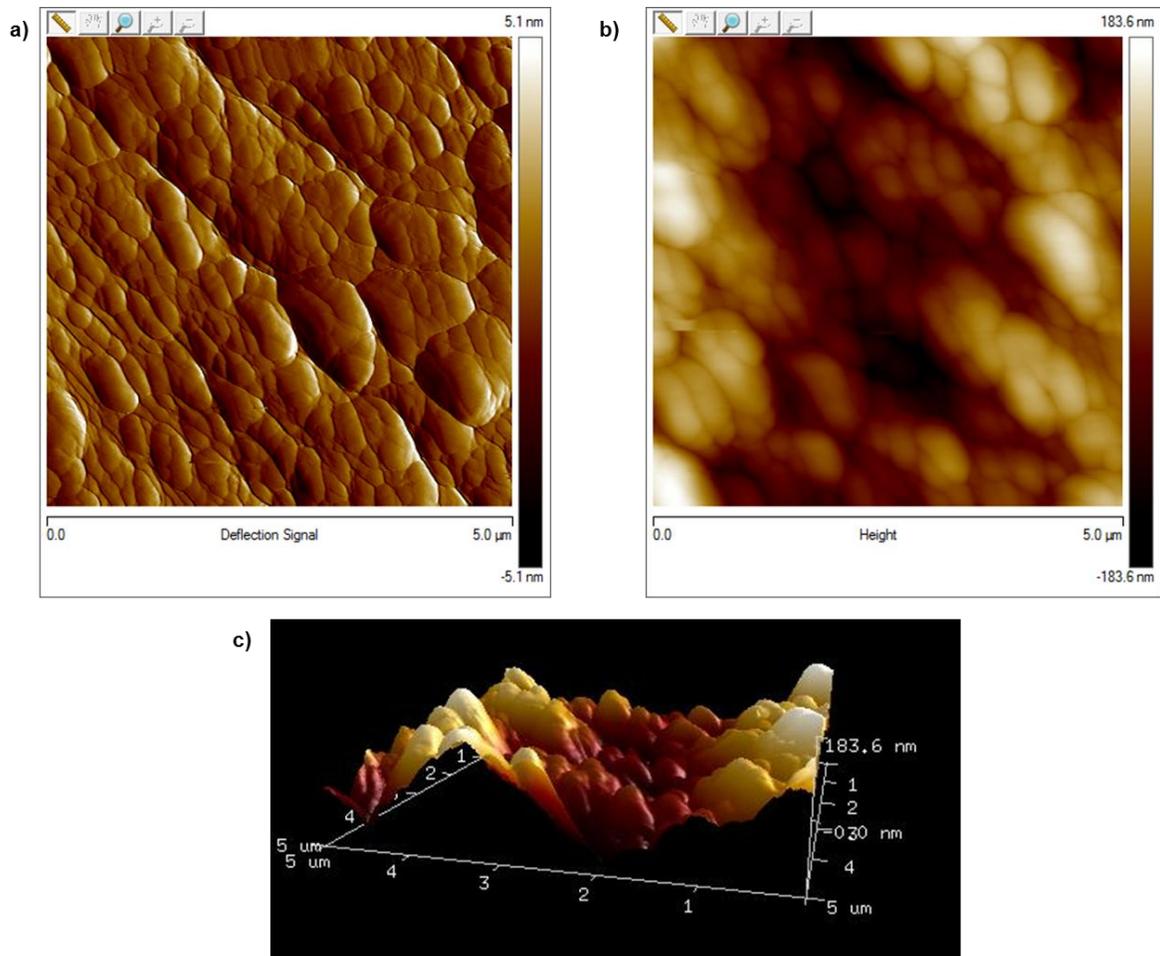
Para este método únicamente se analizaron muestras de la aleación SAE783 con tratamiento térmico ya que se consideró de mayor relevancia recopilar información acerca de la superficie de este material en particular.

Hay tres tipos de imágenes que se obtienen a partir del MFA, una de la señal de deflexión del cantiléver y dos que representan las alturas, de las cuales una es en tres dimensiones.

La figura 3.22 es una de las imágenes de áreas externas a la huella, mientras que la figura 3.23 corresponde a una de las zonas internas a la misma. Con ambas, es posible comparar la superficie original y la desgastada.



**Figura 3.22** Imágenes obtenidas mediante MFA en modo de contacto en zona sin desgaste.  
a) Señal de deflexión. b) De alturas.



**Figura 3.23** Imágenes obtenidas mediante MFA en zona desgastada. a) Señal de deflexión. b) De alturas. c) Topografía en tres dimensiones.

Fuera de la huella se observa una superficie más “plana”, es decir cuya rugosidad es relativamente baja. Por otra parte, dentro de la huella (figura 3.23) se formó una estructura por completo diferente, se distinguen surcos que bien pueden ser los límites de granos alargados formados durante la acción tribológica, éstos miden algunos pocos micrómetros de espesor y se conforman a su vez por subgranos circulares de cientos de nanómetros de diámetro.

### 3.2.4 Coeficientes de fricción

Las gráficas presentadas a continuación (Figuras 24-27) muestran la variación del coeficiente de fricción ( $\mu$ ) durante uno de los ensayos tribológicos más representativos de cada material. En todos éstos, el coeficiente de fricción alcanza un rango pequeño de valores donde aparentemente se estabiliza y que sirve como referencia para comparar entre los cuatro materiales.

Se observa en las gráficas que el coeficiente de fricción alcanza su máximo valor al inicio del ensayo tribológico y se estabiliza en un valor aproximadamente a la mitad del mismo. En todos los materiales se pueden distinguir dos etapas, una al inicio del ensayo donde  $\mu$  fluctúa y alcanza su máximo valor y otra donde ya se ha estabilizado.

Los coeficientes calculados para las muestras de Al 1100 alcanzan valores superiores a 1 al inicio de los ensayos y se estabilizan alrededor de 0.6. Por su parte las muestras de SAE783 se estabilizan cerca de 0.1, sin embargo, además de presentar fluctuaciones menores, las muestras CTT alcanzan un valor máximo de 0.2, a comparación del material STT que llega hasta 0.4.

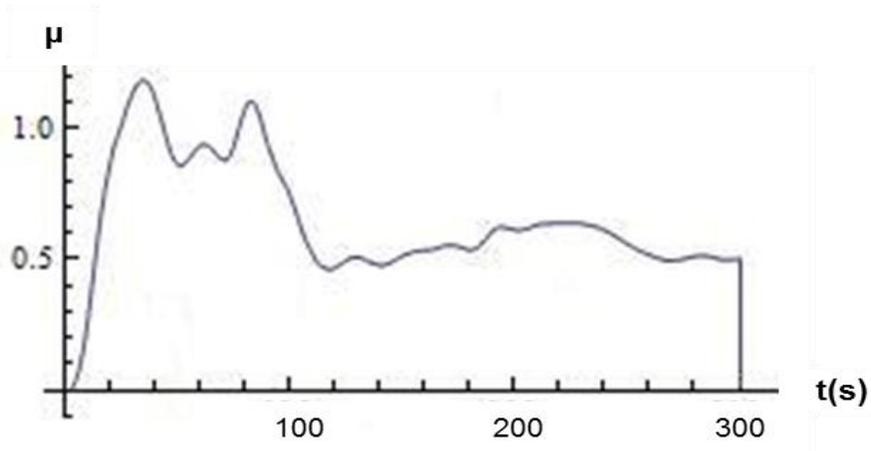


Figura 3.24 Coeficiente de fricción de Al 1100 STT durante el ensayo tribológico.

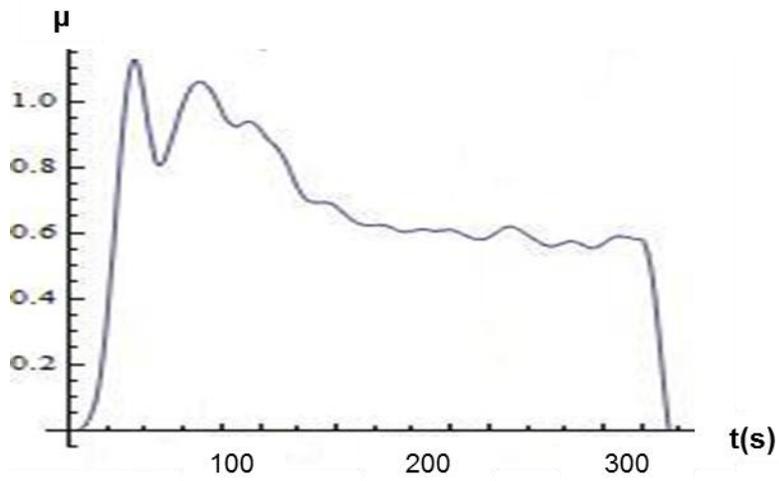


Figura 3.25 Coeficiente de fricción de Al 1100 CTT durante el ensayo tribológico

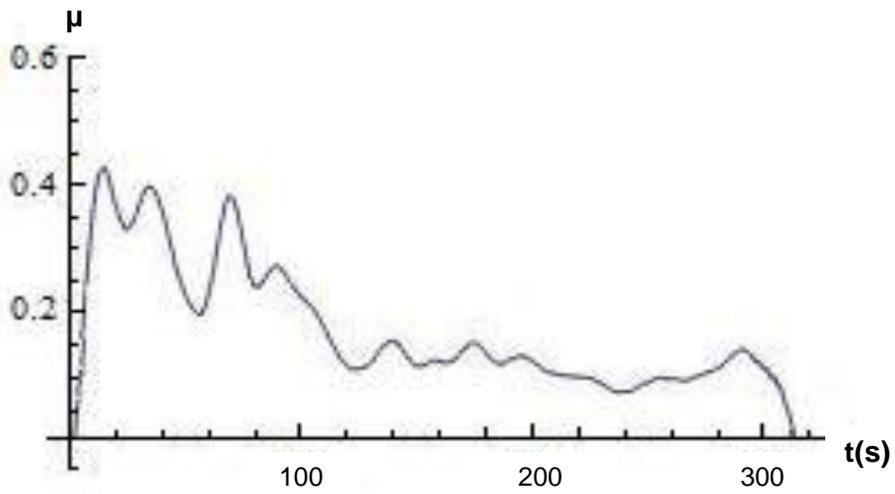


Figura 3.26 Coeficiente de fricción de SAE783 STT durante el ensayo tribológico

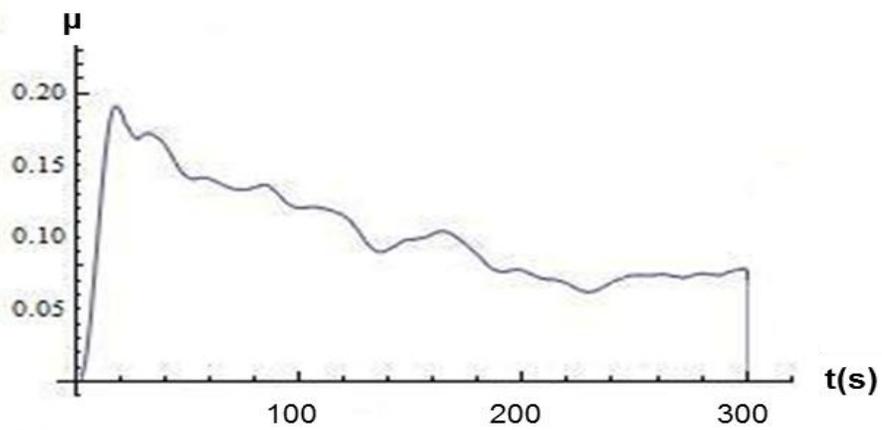


Figura 3.27 Coeficiente de fricción de SAE783 CTT durante el ensayo tribológico

### 3.2.5 Visualización y caracterización de las tribocapas

Ya que las TC son zonas de MM, únicamente es posible observar las muestras de la aleación SAE783, que son las que presentan dos fases que pudieron mezclarse. Además, en esta sección todas las imágenes pertenecen al detector BSE del MEB.

#### SAE783 STT

En las imágenes se pueden distinguir tres zonas características del desgaste que se encuentran a diferentes profundidades de la superficie (Figura 3.28): La más profunda y predominante pertenece al material original sin modificación, que posee una matriz gris de Al y listones blancos de estaño intercalado, paralelos y que son consecuencia del proceso de laminación. A continuación se puede observar una zona donde aparentemente el material fluye, efecto muy notorio por a los listones de estaño que han cambiado su dirección, ésta es la zona de deformación plástica (ZDP). Finalmente y en la parte más superficial de la muestra, se encuentra una zona visiblemente más homogénea de color gris, ésta es la TC.

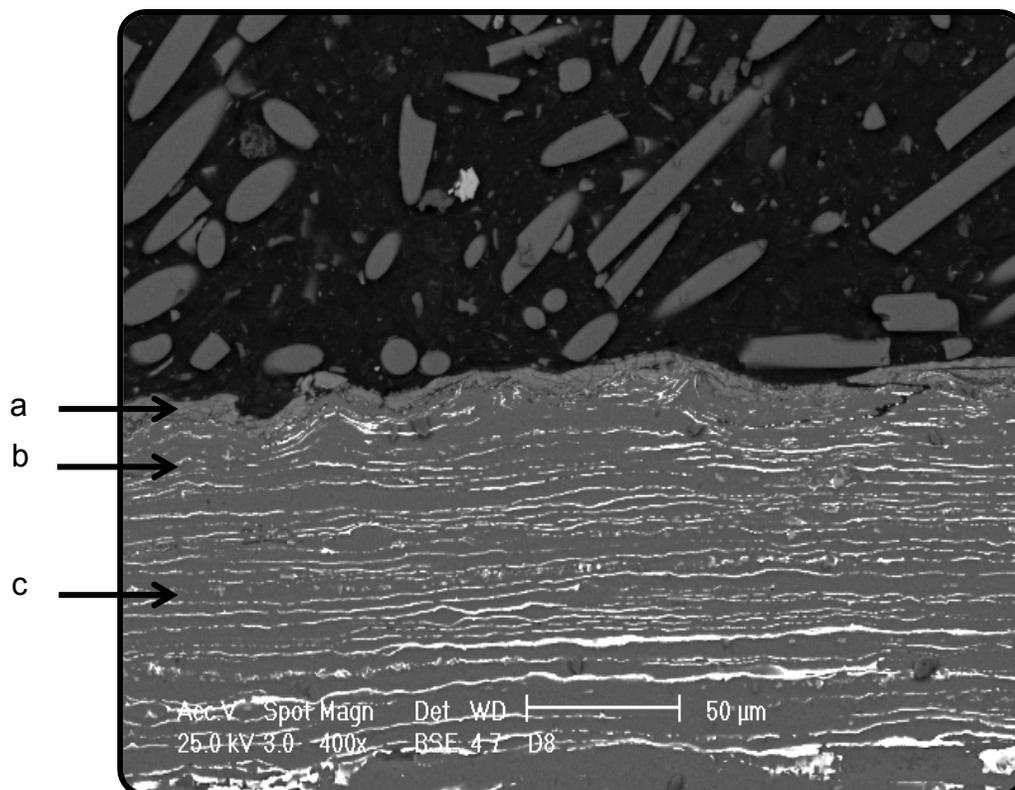
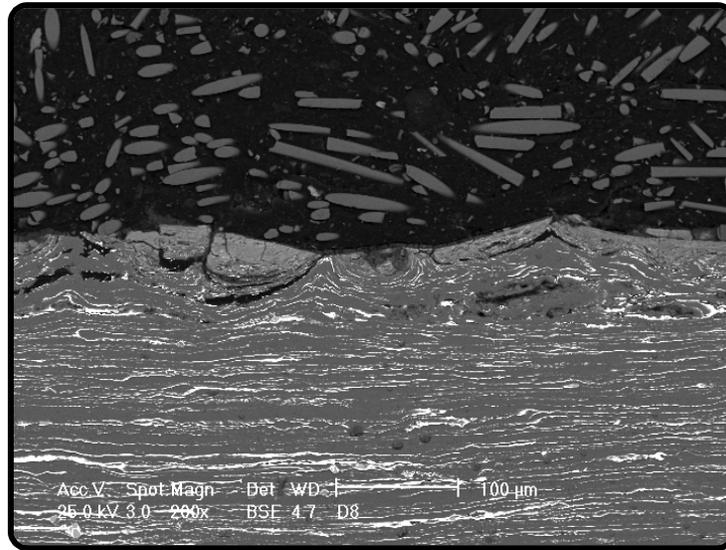


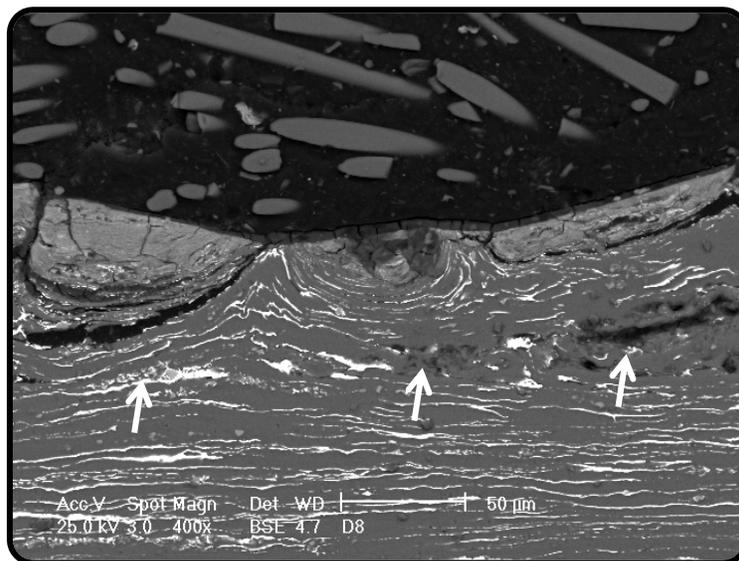
Figura 3.28 Se distinguen las tres capas características del desgaste: a) TC. b) ZDP.  
c) zona sin modificación

La ZDP toca la superficie a través de la TC, provocando su discontinuidad (Figura 3.29). Por otra parte las grietas que corren a través de los listones de estaño y también alcanzan la superficie debido a que los listones por donde corren se han deformado de esta forma, propician la separación de volúmenes considerablemente grandes. Además se generan otro tipo de discontinuidades en el material que no se pueden considerar propiamente grietas y que se encuentran por debajo de gran parte de la TC (Figura 3.29).



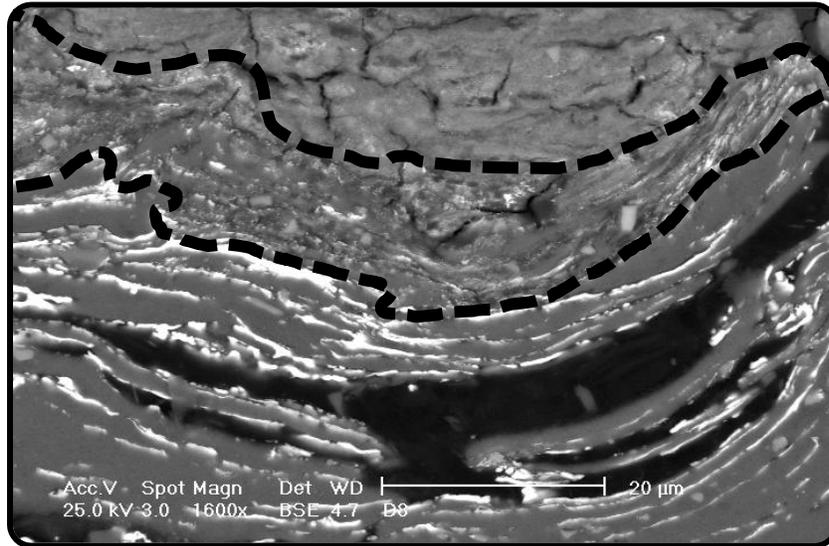
**Figura 3.29 Separación de la TC y presencia de discontinuidades por debajo de ésta.**

Las discontinuidades mencionadas también se propagan en la dirección de los listones de estaño (figura 3.30), su flujo se asemeja a la presencia de vórtices en fluidos.



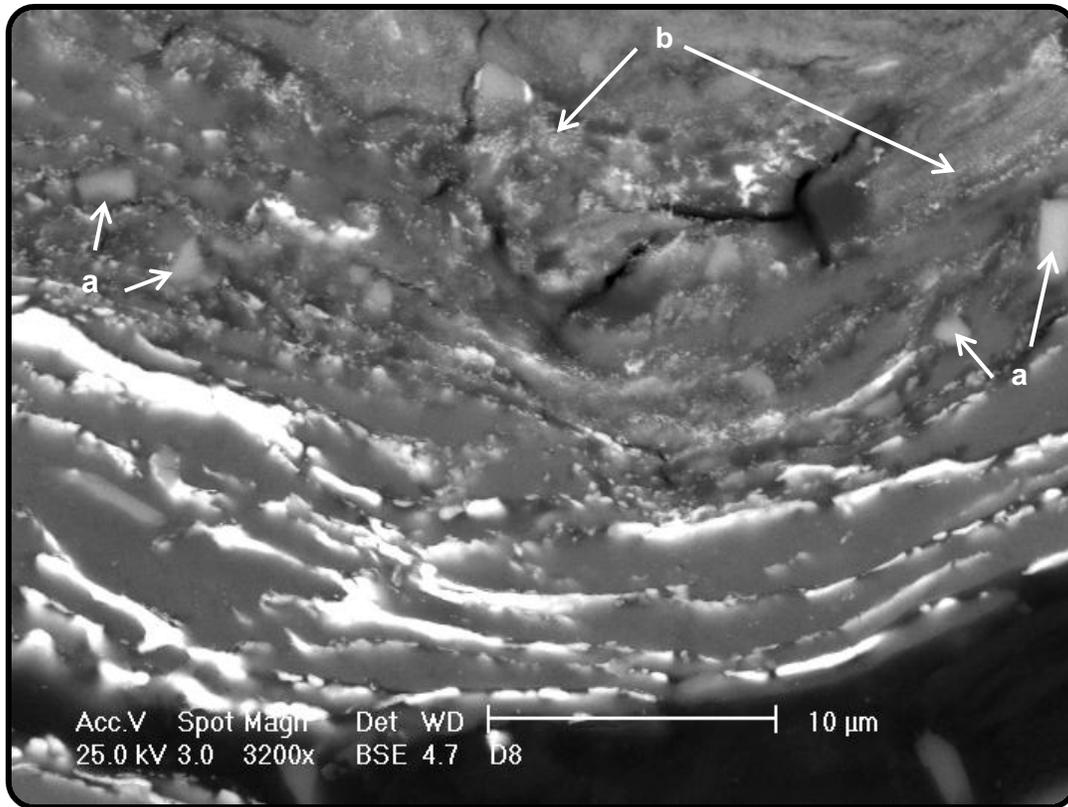
**Figura 3.30, Discontinuidades que fluyen en un patrón que asemeja turbulencia.**

Como se mencionó, la MM se lleva a cabo progresivamente, por lo que se forman diferentes zonas con distintos niveles de mezcla, tanto en la TC como en la ZDP. Es por esto que es difícil determinar dónde comienza cada una de las capas. En la imagen de la figura 3.31 se aprecia este fenómeno, y se distingue una capa en que la mezcla se desarrolló a un nivel intermedio entre la de las zonas colindantes.



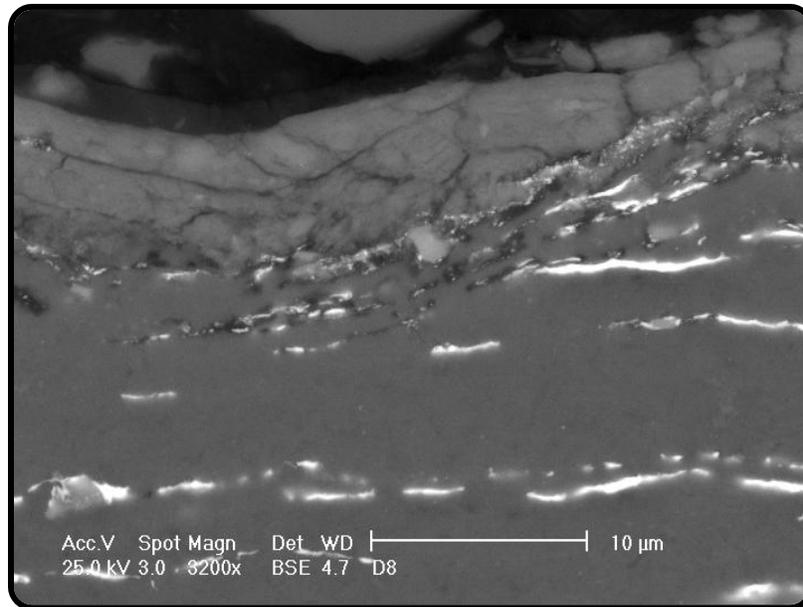
**Figura 3.31 Capa de MM intermedia que forma parte de la TC**

Una consecuencia de lo descrito, es la nanoestructura (figura 3.32) que presenta esta capa, que no se asemeja a ninguna de las que poseen las zonas vecinas. Dentro hay intermetálicos más pequeños que los encontrados afuera de la TC, por lo que es evidente que estos también se han degradado en la mezcla para conformar la TC.



**Figura 3.32** intermetálicos (a) y material nanoestructurado (b) dentro de la TC.

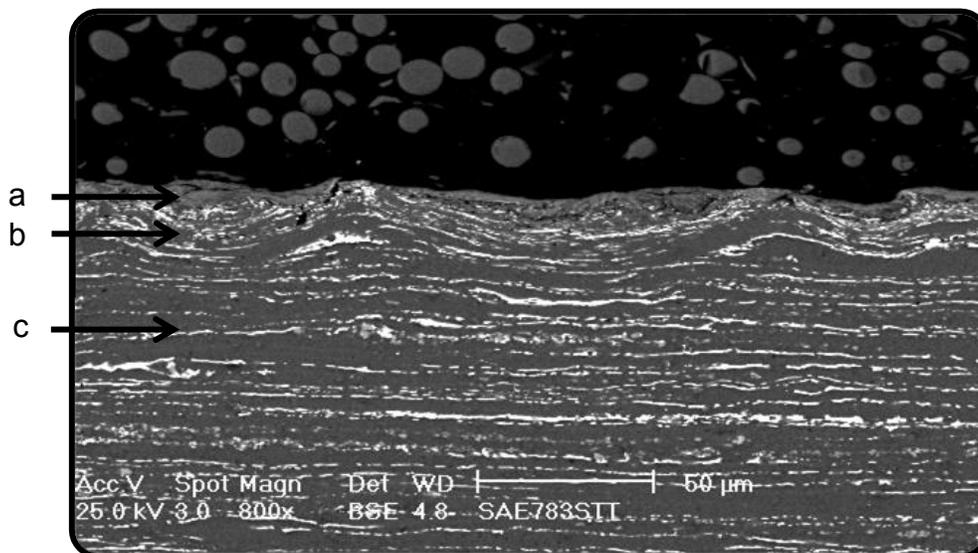
La zona intermedia existe a lo largo de toda la TC, y su espesor es muy variable, como la que se muestra en la figura 3.33 que mide apenas algunos micrómetros. Como consecuencia de la ausencia de largos listones de estaño cercanos y posiblemente menores magnitudes de esfuerzos, en esta parte donde la TC es relativamente delgada se limitó la propagación de grietas grandes por debajo de ésta y la MM progresó de manera casi uniforme. Sin embargo, en la TC existen grietas nanométricas que aíslan volúmenes de material y que, como fue observado por Andresen [3], conforme el proceso continua, su tamaño se irá reduciendo, triturando al material más superficial.



**Figura 3.33 Zona de MM incompleta y agrietamiento en todas direcciones dentro de la TC.**

### SAE783 CTT

En las muestras del material con tratamiento térmico, también es posible distinguir las mismas capas distintivas de la acción tribológica (figura 2.34). Aunque la estructura de este material se asemeja a la de la aleación SAE783 STT, debido al tratamiento térmico, en éstas se distinguen listones de estaño menos largos.



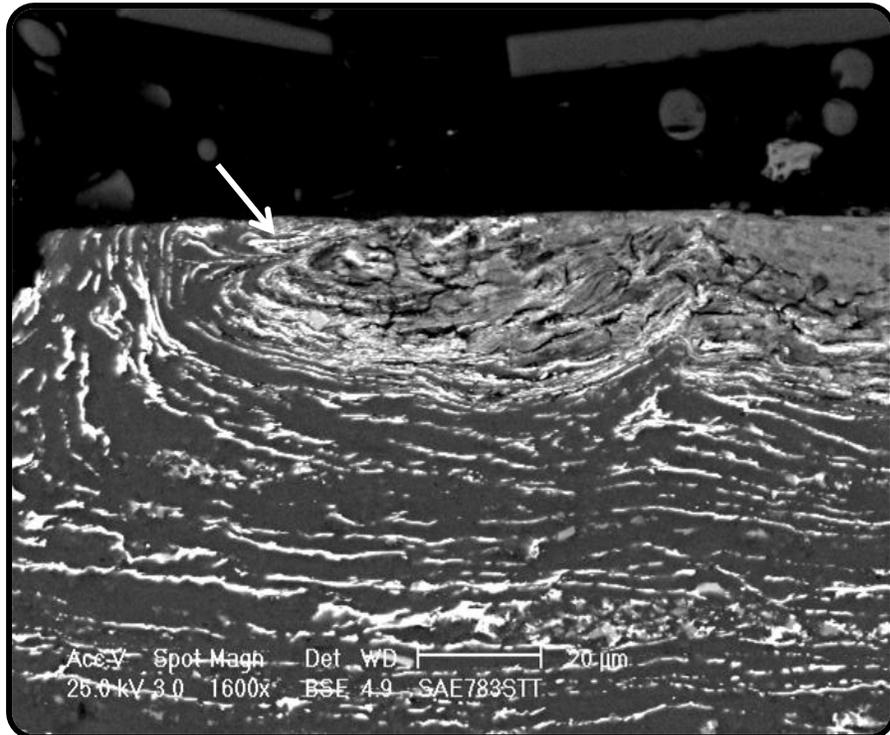
**Figura 3.34 Se distinguen las tres capas características del desgaste: a) TC. b) ZDP. c) zona sin deformación plástica.**

La TC formada en esta muestra alcanza casi 35  $\mu\text{m}$  de profundidad aunque en general mide entre 10 y 15  $\mu\text{m}$ . Por su parte la ZDP mide aproximadamente entre 20 y 30  $\mu\text{m}$  y en general se encuentra por debajo de la TC, sin embargo también se observa, cómo alcanza la superficie, desplazando a ésta última hacia los lados e incluso sobreponiéndose a ella al envolverla, lo que es evidente en la figura 3.35. A la izquierda de esta misma imagen existe una sección relativamente grande que contiene a la TC y parte de la ZDP que aparentemente se desprendió del resto del material gracias a la propagación de una grieta de entre 10 y 20  $\mu\text{m}$  de espesor.

a)

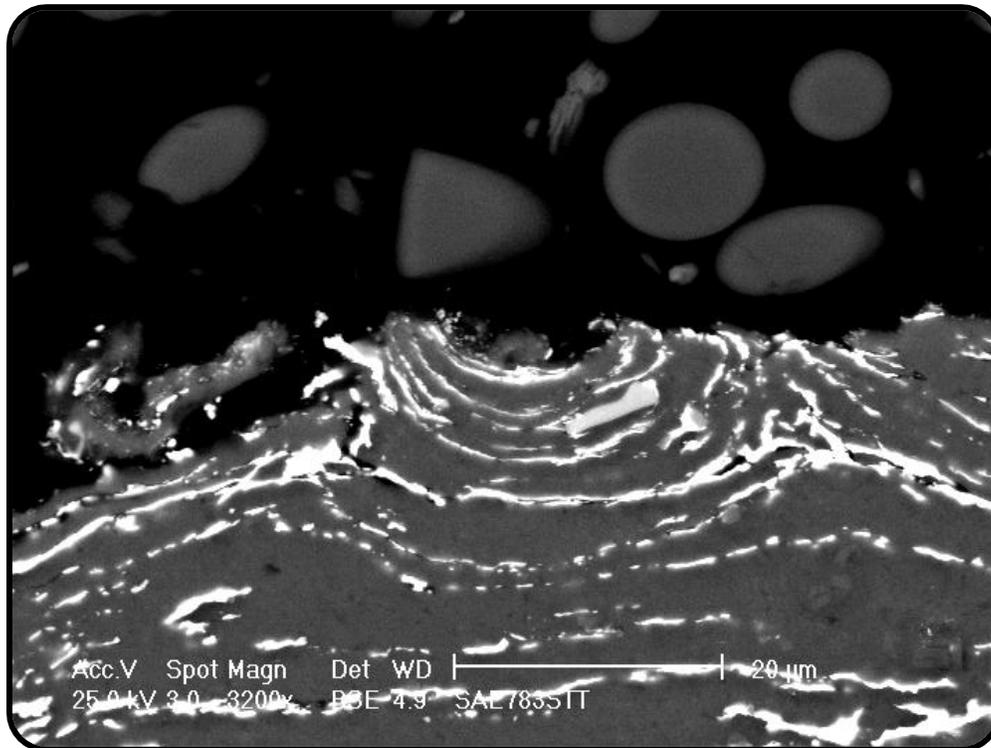


b)



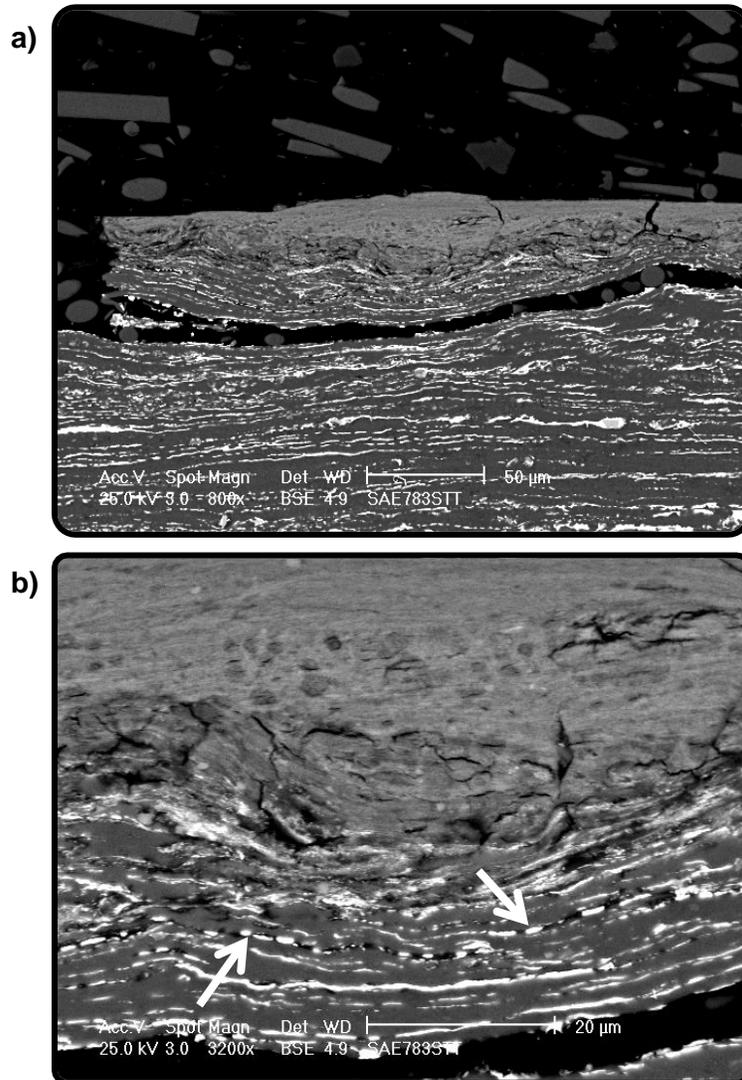
**Figura 3.35 TC desplazada por ZDP. a) Zona desprendida de la TC.  
b) La ZDP se sobrepone a la TC.**

La separación de volúmenes relativamente grandes del material es común para este tipo de materiales en este tipo de ensayos [3]. Es importante considerar que las imágenes mostradas en este capítulo brindan únicamente información de dos dimensiones, con lo cual no se demostraría que existe tal aislamiento de estas zonas. Sin embargo, también es posible encontrar imágenes como la figura 3.36 donde parte de la TC se separó completamente, dejando únicamente la ZDP que tenía por debajo.



**Figura 3.36, parte de la TC se separó completamente de la ZDP.**

El desprendimiento es debido a las grietas que se generan y propagan, delimitando por completo al material al que terminan por separar. En la figura 3.37a se encuentra una sección que mide hasta 50  $\mu\text{m}$  de espesor que ha sido delimitado en su parte inferior y casi por completo, coincide con una de las zonas donde la TC es de mayor espesor. Se observan restos de estaño (blanco) en ambos extremos de esta grieta, lo que pudiera significar que las grietas corren a través de los listones discontinuos de esta fase. Esto es más claro en la figura 3.37b donde grietas de diferentes espesores surgen en los listones de estaño.

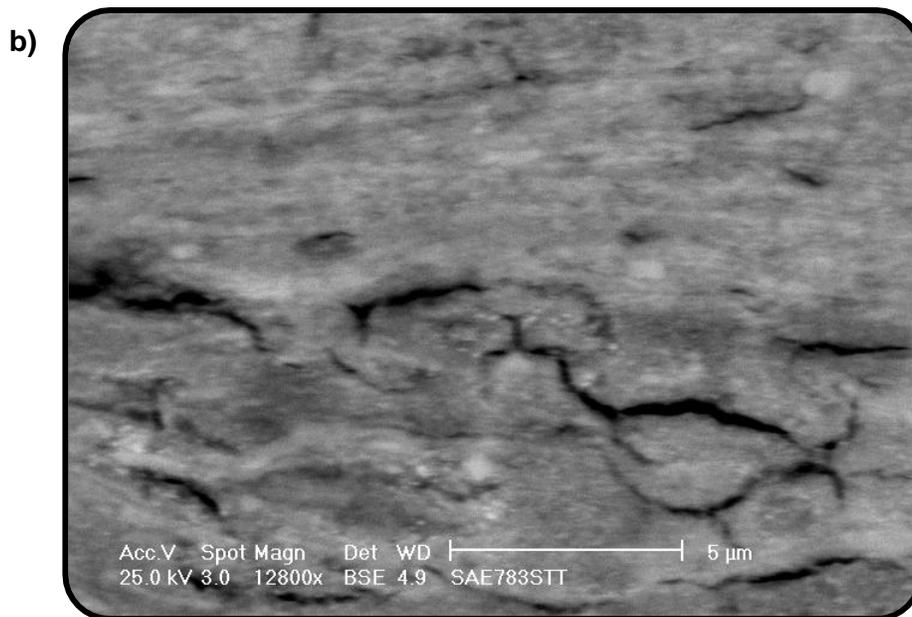
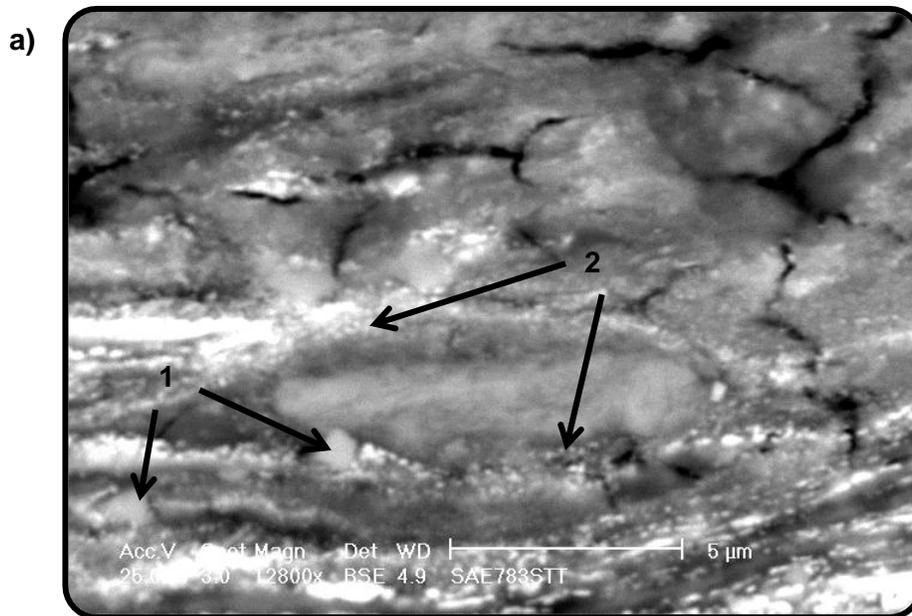


**Figura 3.37 a) Una grieta atraviesa por debajo de la TC a punto de separarla.  
b) Propagación de grietas a través de listones discontinuos de estaño**

La figura 3.37b también se observan restos del proceso de evolución de la TC durante la MM. Observando desde la parte inferior de la imagen, el Al y el estaño están claramente separados, a continuación se encuentran zonas donde se lleva a cabo una mezcla cada vez más fina conforme avanza hacia la superficie y que ya pertenecen a la TC, finalmente en la parte más superficial, la composición es aparentemente homogénea. Dentro de la TC también se observan imperfecciones que se asemejan a burbujas o poros en el material, así como también grietas de escalas nanométricas que crecen preferencialmente dentro de estas imperfecciones.

Se obtuvieron imágenes a mayores aumentos de dos áreas características de la TC. La primera (Figura 3.38a) pertenece a una de las zonas intermedias donde la MM no se completó pues se distingue la presencia de intermetálicos, posiblemente de  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  que es un compuesto característico en la aleación [28], así como granos nanométricos de estaño sin mezclar, generando un material nanoestructurado. La segunda imagen (Figura 3.38b) se trata de una de las zonas más superficiales de la TC donde se realizó una mezcla más fina por lo que su tono es prácticamente homogéneo. Sin embargo, en ella también se detecta la presencia de intermetálicos y granos de estaño de mucho menor tamaño que en la primera imagen, evidenciando que el proceso progresó más en esta zona.

Ambas imágenes sugieren que el proceso de MM se lleva a cabo a niveles nanométricos de manera semejante a la que se realiza micrométricamente.



**Figura 3.38 a) Intermetálicos (1) y material nanoestructurado (2).  
b) Homogeneidad en la mezcla y volúmenes nanométricos de Sn.**

## Conclusiones

A pesar de algunos problemas prácticos procedentes del uso del equipo prototipo diseñado dentro del grupo, se realizaron con éxito los ensayos tribológicos bajo las condiciones especificadas. De esta manera, los resultados aportan valiosa información acerca del comportamiento del Al1100 y de la aleación SAE783 durante el desgaste.

Durante los ensayos tribológicos fue posible distinguir entre el comportamiento de los materiales en una situación real. Durante los ensayos del Al 1100 en comparación de la aleación SAE783, no sólo se requirió de mayor torque para vencer la fricción, sino que el tiempo de estabilización, la fluctuación y el valor máximo de dicha variable fue notablemente superior. Lo mencionado se demostró mediante las curvas generadas con los datos obtenidos por el torquímetro.

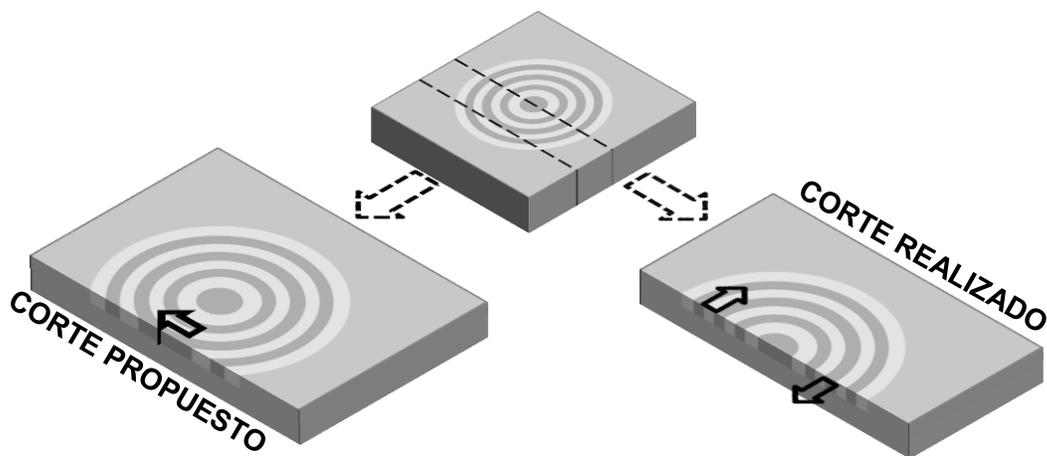
Tanto la rugosidad como el diámetro de las huellas son manifestaciones visibles de la deformación plástica generada durante los ensayos, es decir del desgaste. Al utilizar perfilometría óptica para caracterizar las superficies, los datos demostraron que los materiales STT expusieron valores de rugosidad más altos que sus contrapartes CTT, lo cual evidencia que el tratamiento térmico permite que los materiales se adapten ante la carga para responder mejor ante el desgaste. Por otra parte, la comparación del tamaño de las huellas permitió estimar las ventajas del material aleado sobre el de referencia, siendo notablemente mayores los diámetros de este último.

Las micrografías electrónicas de barrido posibilitaron la identificación de zonas de mezcla y desgaste, la comparación entre las diferentes superficies y sus particularidades, así como la caracterización de la microestructura de los materiales. Se observaron en todas las muestras señales de desgaste adhesivo, aunque en mucho menor medida en las muestras de SAE783 como era de esperarse. De esta manera y considerando que la compatibilidad tribológica de un par de materiales es la capacidad de no adherirse a su contraparte, se entiende que el material SAE783 presenta propiedades óptimas en este sentido. Además fue posible visualizar surcos (con trayectorias circulares cerradas en el caso del SAE783) y grietas (igualmente menores en el material tribológico), corroborando los beneficios durante el desgaste de este material.

Con el MFA se estudió a mayor detalle la topografía de las muestras de la aleación SAE783 CTT. Se obtuvieron imágenes que mostraron la morfología de los granos y subgranos del material generados a partir de la acción tribológica.

El cálculo de los coeficientes de fricción corroboró que la aleación de Al-Sn es favorable para su uso en cojinetes de deslizamiento, particularmente la tratada térmicamente cuyo valor después de estabilizarse resultó casi dos veces inferior a la no tratada y de 4 a 6 veces menor que las de Al 1100. De igual manera, la aleación presentó pocas fluctuaciones en comparación con el material de referencia, lo que lo favorece como material tribológico.

El análisis de la TC en muestras de SAE783 brindó información acerca del proceso de desgaste en que el material se mezcla y fractura a diferentes escalas, donde la TC interactúa siempre con la ZDP. Por otra parte, también sería interesante realizar un corte de las muestras sin atravesar el centro de la huella (Figura 5.1), esto permitiría estudiar la formación de la TC según las diferentes direcciones de desgaste, a comparación del corte realizado donde la dirección siempre es perpendicular a la cara expuesta.



**Figura 5.1 Corte propuesto y corte realizado para las muestras ensayadas, se muestra la dirección del desgaste en cada una.**

También fue posible determinar los beneficios en estos materiales de la recristalización generada durante los tratamientos térmicos. En particular resulta muy interesante que en el material SAE783 las grietas se propagan a través de los listones de

estaño, y que mediante recocido es posible limitar el tamaño de los mismos, evitando este efecto presente en el desgaste.

En general, los resultados comprueban que el material SAE783 posee características más apropiadas para impedir el desgaste severo durante la acción tribológica a comparación del Al, aunque esto era de esperarse ya que el primero es un material tribológico, este estudio brinda elementos para comprender de mejor por qué sucede de esta manera.

# Bibliografía

1. Bhushan, Bharat et al. (2001). *Modern tribology handbook*. USA: CRC Press LLC.
2. Budynas, R. y Nisbett J. (2011). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 9ª ed. México. Mc Graw Hill.
3. Andresen Eguiluz, R. C. (2010). *Análisis de la tribocapa de la aleación SAE783 Ensayada en un tribómetro coaxial*. Tesis, Maestría en Ciencias e Ingeniería de Materiales, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.
4. Stachowiak, G. y Batchelor, A. (2005). *Engineering tribology*. 3ª ed. Australia: Elsevier Butterworth Heinemann.
5. Ludema, K. (1996). *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. USA: CRC Press LLC.
6. Beer, F. et al. (2004). *Mecánica Vectorial para Ingenieros: Estática*. 7ª ed. México: McGraw Hill.
7. Ludema, K. (2004). *ASM handbook. Volume 18: Introduction to wear*.
8. Stolarsky, T. A. (1990). *Mechanical engineering tribology in machine design*. London: Butterworth Heinemann
9. Cheng H. (2004). *ASM handbook. Volume 18: Introduction to lubrication*.
10. Figueroa Alcántara, C. G. (2011). *Caracterización de la compatibilidad tribológica en aleaciones dúctiles mediante un ensayo de tribometría coaxial*. Tesis, Maestría en Ciencias e Ingeniería de Materiales, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.
11. Shakhvorostov, D., Pöhlmann, K y Scherge, M. (2005). *Structure and mechanical properties of tribologically induced nanolayers*. *Wear*, 260:433-357.
12. V. Panin, A. Kolubaev, S.Tarasov y V.Popov (2002). *Subsurface layer formation during sliding friction*. *Wear*, 249:860-867.
13. Rigney D. (2000). *Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials*. *Wear*, 255:395-400.
14. Schouwenaars, R., Jacobo, V., Cerrud, S. y Ortiz, A. (2005). *Tribolayer formation as a functionally self-grading process in soft anti-friction alloys*. *Material Science Forum*, 492-493:531-538.]
15. Ruff, A. (2004). *ASM handbook. Volume 18: Introduction to wear*.

16. Faires, V. M. (1992). *Diseño de elementos de máquinas*. 4ª ed. México: Limusa Noriega.
17. Axén, N., Hogmark, S. y Jacobson S. (2001) *Modern tribology handbook. Volume two: Friction and wear measurement techniques*.
18. Ruff, A. (2004). *ASM handbook. Volume 18: Wear measurement*.
19. Stachowiak, G. W., Batchelor, A. y Stachowiak, G.B. (2004). *Experimental Methods in Tribology*. Elsevier.
20. NANOVEA®. *Chromatic confocal Technique* [en línea]. Estados Unidos, 2013. [Fecha de consulta: octubre 2014] Disponible en: <<http://www.nanovea.com/chromatic-confocal.html>>.
21. Cha, Sungdo (2000). *Nontranslational three-dimensional profilometry by chromatic confocal microscopy with dynamically configurable micromirror scanning*. Applied Optics, Vol39, No.16:2605-2613
22. Yao, N. y Wang, Z. L. (2005). *Handbook of Microscopy for Nanotechnology*. Kluwer Academic Publishers.
23. Amelinckx, S. et al. (1997). *Handbook of Microscopy. Methods II*. VCH
24. ISAAC : Imaging Spectroscopy and Analysis Centre, University of Glasgow. *Scanning Electron Microscopy (SEM)* [en línea]. Glasgow, Reino Unido. [Fecha de consulta: octubre 2014] Disponible en: <<http://www.gla.ac.uk/schools/ges/research/researchfacilities/isaac/services/scanningelectronmicroscopy>>.
25. Durán Cortés H. (2007). *Superficie de respuesta para el proceso termomecánico de la aleación SAE783*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.
26. Schouwenaars, R. Jacobo, V.H. y Ortiz, A. (2007). *Tailoring the mechanical properties of Al-Sn alloys for tribological applications*. Materials Science Forum 539- 543: 317-322.
27. Lara Paredes, J. G. (2013). *Rediseño de un tribómetro coaxial*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.
28. Bravo Bénard, A. (2008). *Caracterización de una aleación Al-Sn producida por colaminado acumulado*. Tesis, Maestría en Ciencias e Ingeniería de Materiales, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.