

***Caracterización de la compatibilidad
tribológica en aleaciones dúctiles
mediante un ensayo de tribometría
coaxial***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIA E
INGENIERÍA DE MATERIALES**

P R E S E N T A:

CARLOS GABRIEL FIGUEROA ALCÁNTARA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. RAFAEL SCHOUWENAARS FRANSSENS



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice

Resumen	7
Abstract	8
Prólogo	9
Objetivos	11
Capítulo 1. Introducción	12
Capítulo 2. Antecedentes	18
2.1. Tribología	18
2.1.1. Fricción	18
2.1.2. Lubricación	20
2.1.3. Desgaste	21
2.1.3.1. Evaluación del proceso de desgaste	23
2.1.4. Ensayos tribológicos	25
2.2. Materiales tribológicos	27
2.2.1. Cojinetes de deslizamiento	27
2.2.2. Materiales para cojinetes de deslizamiento	29
2.3. Tribocapas	31
2.4. Dureza	31
2.4.1. Microdureza	32
2.4.2. Indentación instrumentada	32
2.5. Medición de deformaciones	33
Capítulo 3. Desarrollo experimental	35
3.1. Diseño del dispositivo sensor	35

3.1.1. Fabricación del dispositivo sensor	36
3.1.2. Modelado y simulación del dispositivo sensor	37
3.2. Modelado del experimento	39
3.2.1. Modelo de dureza Brinell	39
3.2.2. Modelado por método de elementos finitos	41
3.3. Ensayo tribológico	45
3.3.1. Tribómetro	46
3.3.1.1. Sistema de aplicación de carga y giro	46
3.3.2. Material utilizado	47
3.3.3. Preparación de pernos y probetas	47
3.3.4. Caracterización mecánica del material tribológico	48
3.3.5. Realización del ensayo tribológico	49
3.3.6. Caracterización del material ensayado tribológicamente	49
3.3.6.1. Medición de masa	49
3.3.6.2. Medición de rugosidad	50
3.3.6.3. Indentación instrumentada	51
3.3.6.5. Microscopía óptica y electrónica	52
Capítulo 4. Resultados	54
4.1. Evaluación del proceso tribológico	54
4.2. Rugosidad	55
4.3. Diámetros de huellas tribológicas	59
4.4. Indentación instrumentada	64
4.5. Comportamiento del material durante el ensayo tribológico	65

4.6. Microestructuras	66
4.6.1. Superficies	66
4.6.2. Evolución de microestructuras	77
4.6.2.1. 30 segundos de ensayo	77
4.6.2.2. 60 segundos de ensayo	80
4.6.2.3. 120 segundos de ensayo	83
4.6.2.4. 240 segundos de ensayo	87
4.6.2.5. 480 segundos de ensayo	90
4.6.2.6. 600 segundos de ensayo	91
4.6.2.7. Material sin tratamiento térmico	92
4.6.3. Perfil de indentaciones	94
Capítulo 5. Discusión	96
5.1 Ensayo tribológico	96
5.2 Proceso de desgaste	99
5.3 Diámetros medidos y resultado de la simulación	100
5.4 Indentación instrumentada	101
5.5 Microestructuras	102
Capítulo 6. Conclusiones	105
Bibliografía	106

Resumen

La fricción que se da entre las diversas piezas de los motores de combustión interna representa pérdidas energéticas y económicas que a lo largo de los años se han tratado de disminuir mediante el estudio y desarrollo de la tribología. En el presente trabajo se ha analizado y caracterizado el comportamiento tribológico de la aleación SAE 783 (Al 20%Sn-1%Cu,% peso) empleada actualmente como material funcional en cojinetes de deslizamiento para la industria automotriz.

Se aplicó un proceso termomecánico al material salido de fundición, que consistió en un proceso de laminado en frío hasta lograr una deformación equivalente de Von Mises de 3, seguido de un recocido a 300°C durante 30 minutos, posteriormente mediante la utilización de un tribómetro coaxial se sometió el material a procesos de desgaste variando el tiempo de ensayo y manteniendo constante la carga aplicada y la velocidad de giro de un perno de acero AISI 9840 (Fe-0.4%C-0.25%Si-0.8%Mn-1%Ni-0.25%Mo,% peso) que actuó como contraparte tribológica.

El proceso de desgaste se analizó mediante la medición de masas y rugosimetría de contacto. Los cambios en microestructura y propiedades mecánicas producto del ensayo se caracterizaron por medio de microindentación instrumentada y microscopía electrónica de barrido. Se observó la formación de una capa nanoestructurada producto de mezcla mecánica la cual presenta una dureza mayor a la del material original.

Con la finalidad de establecer otro parámetro de evaluación de los resultados obtenidos, se presentan simulaciones del ensayo tribológico realizadas por medio del Método de Elementos Finitos sin tomar en cuenta los efectos de termofluencia. El modelo es consistente con lo observado experimentalmente.

Abstract

The friction between the different parts of an internal combustion engine represents significant energetic and economic losses. Extensive studies in the field of tribology have been undertaken over the years to reduce these losses. In the present work, the tribologic behavior of the SAE 783 alloy (Al 20%Sn-1%Cu, %weight) was analyzed and characterized. This alloy is currently used as a functional material in journal bearings for the automotive industry.

A thermomechanical process was applied to the cast material, which consisted of cold rolling to a Von Mises' equivalent strain of 3, followed by annealing at 300°C for 30 minutes. Using a coaxial tribometer, the material was subject of a wear process by different times keeping constant the applied load and the radial speed of an AISI 9840 steel pin (Fe – 0.4%C–0.25%Si–0.8%Mn–1%Ni–0.25%Mo, % weight) used as the tribologic counterpart.

The wear process was analyzed by weight loss and contact measurement of roughness. The changes of the microstructure and mechanical properties caused by the test were characterized by instrumented indentation and scanning electron microscopy. The formation of a nanostructured layer produced by the mechanical mixing of the surface layers during the process was observed; this layer has significantly higher hardness than the original material.

In order to obtain another parameter and evaluation of results, a simulation of the tribologic test (without taking into account creep phenomena) was performed using the Finite Element Method. This model shows consistent results when compared to the experimental work.

Prólogo

La presente tesis forma parte de una extensa serie de trabajos que se ha venido desarrollando desde hace más de quince años y en la cual se incluyen desde tesis de licenciatura hasta tesis doctorales; así como una gran cantidad de artículos presentados en congresos nacionales e internacionales.

A lo largo de todo este tiempo se ha estudiado y caracterizado de manera exhaustiva la utilización de aleaciones dúctiles tales como los sistemas aluminio-estaño, aluminio-silicio-estaño y cobre-plomo; esto con la finalidad de lograr la obtención de materiales que cumplan con los requerimientos mecánicos y tribológicos necesarios para ser utilizados en cojinetes de deslizamiento de uso automotriz.

La investigación previa y relativa al presente trabajo ha incluido desde el estudio de la deformación plástica durante el desgaste en aleaciones dúctiles hasta el análisis de la evolución microestructural de las mismas, incluyendo la realización de modelos mediante los cuales se han simulado los procesos de fabricación de cojinetes, tales como el laminado y colaminado; también se han realizado modelos matemáticos con la finalidad de lograr la optimización de procesos termomecánicos para la obtención de las propiedades mecánicas deseadas en un cojinete de deslizamiento y la caracterización de las mismas. Se ha estudiado la adición de modificadores y refinadores de grano, así como el proceso de fundición mediante el cual se obtiene la materia prima de los cojinetes.

Con base en lo anteriormente descrito es que se puede afirmar que el proceso de obtención del material, así como la optimización de sus propiedades mecánicas son temas que se han estudiado ampliamente y por ello es que se ha decidido expandir el estudio de éstos materiales hacia el campo de la tribología.

Con la finalidad de dar continuidad al estudio de las aleaciones utilizadas en cojinetes de deslizamiento para uso automotriz, en el presente trabajo se ha decidido caracterizar su comportamiento tribológico mediante dispositivos diseñados específicamente con este fin y con ello facilitar su caracterización mecánica y microestructural.

La realización del presente trabajo se llevó a cabo en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM), dentro de las instalaciones de los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, bajo la guía y dirección del Dr. Rafael Schouwenaars Franssens.

El trabajo se dividió en dos partes, en las cuales se han involucrado conceptos de diseño mecánico y de ciencia de materiales.

En la parte correspondiente al diseño mecánico, se modificó el sistema de aplicación de carga del tribómetro coaxial utilizado en la UDIATEM, además de que se diseñó y fabricó un dispositivo instrumentado el cual permitió sensar correctamente la aplicación de cargas mediante la medición de deformaciones. En la presente tesis se han omitido gran cantidad de detalles relativos a esta parte del trabajo ya que al ser una tesis de Ciencia e Ingeniería de Materiales se ha decidido mostrar únicamente la forma en que el dispositivo cumple con su función.

La parte experimental y que involucra directamente a la Ciencia e Ingeniería de Materiales consistió en la caracterización mecánica, tribológica y microestructural de la aleación SAE 783 con y sin tratamiento térmico, haciendo énfasis en la tribocapa formada a partir del ensayo tribológico realizado.

Objetivos

- Diseñar y fabricar un dispositivo instrumentado que permita la correcta y precisa medición de cargas aplicadas mediante el sistema de transmisión del tribómetro coaxial utilizado en la UDIATEM.
- Generar mediante un ensayo tribológico zonas de mezcla mecánica cuyas propiedades tribológicas sean óptimas para la utilización del material sometido a estudio en cojinetes de deslizamiento utilizados en motores de combustión interna.
- Caracterizar las propiedades mecánicas de la tribocapa obtenida durante el ensayo tribológico por medio de indentación instrumentada.
- Caracterizar metalográficamente la tribocapa obtenida durante el ensayo tribológico mediante microscopía electrónica de barrido.
- Relacionar el comportamiento del material durante el ensayo tribológico con un modelo generado a partir de simulación mediante un *software* de elemento finito.

Capítulo 1. Introducción

El principio en el cual se basa el funcionamiento de un motor de combustión interna es la conversión de energía química de un combustible a energía mecánica que usualmente es utilizada en elementos rodantes [1]. Uno de los mayores inconvenientes de los motores de combustión interna es la baja eficiencia térmica y mecánica que presentan ya que, como se muestra en la Figura 1.1, cerca del 60% de la energía proporcionada por el combustible es disipada en forma de calor ya sea por medio del sistema de escape o el calentamiento de las superficies que conforman el motor. Las pérdidas mecánicas, las cuales se presentan principalmente como fricción representan cerca del 15%, por lo que sólo una cuarta parte de la energía original es aprovechada [2].

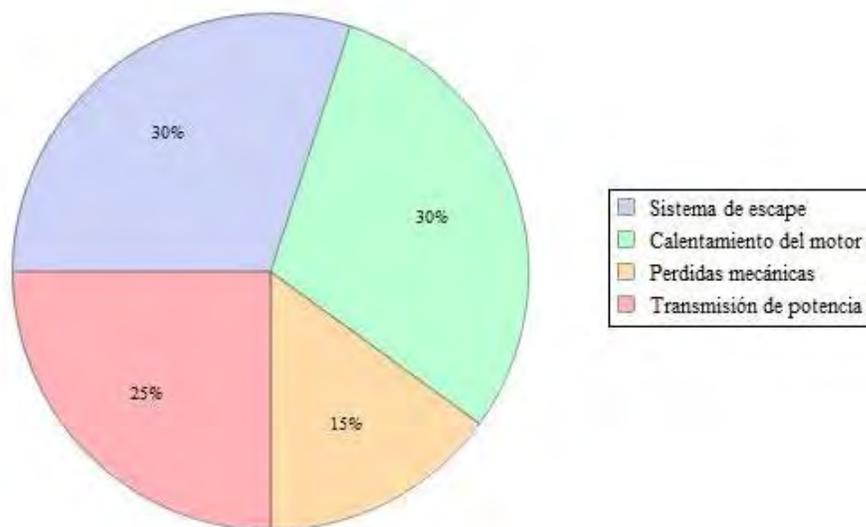


Figura 1.1 Distribución de la energía química proporcionada por el combustible en un motor de combustión interna; sólo el 25% de la energía total se utiliza como trabajo mecánico [2].

Las pérdidas mecánicas se presentan conforme la distribución mostrada en la Figura 1.2, donde los efectos de la fricción en anillos y pistones representan el 41% de dichas pérdidas, seguido de los cojinetes que consumen el 3% de la energía total que se proporcionó mediante la reacción química del combustible. Este 3% de la energía total suministrada, es equivalente al 12% de la energía que se aprovecha generando trabajo mecánico en el sistema de transmisión de potencia. El restante 39% de las pérdidas

mecánicas se distribuye en los efectos de fricción generados en las válvulas y levas con el 11% de las pérdidas, elementos auxiliares con el 12% y fricción entre los elementos que conforman el sistema de transmisión con el 16% [3].

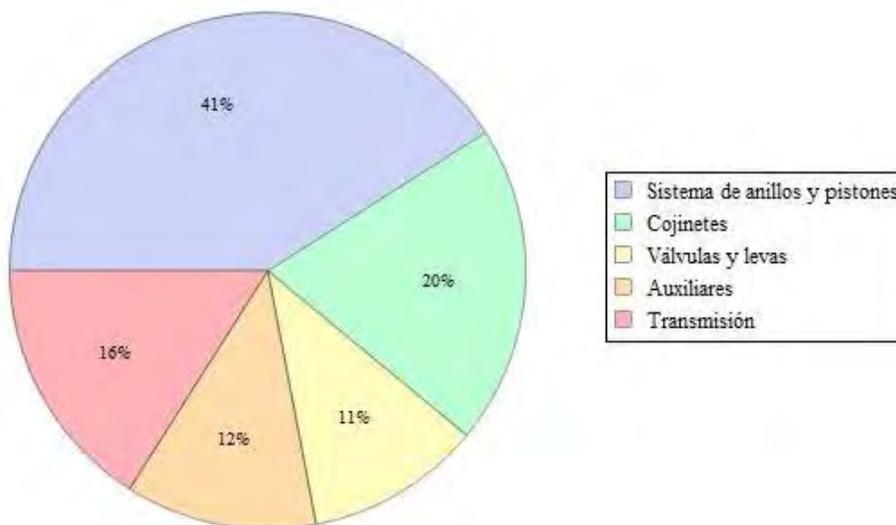


Figura 1.1 Distribución de las pérdidas mecánicas en un motor de combustión interna [3].

Es evidente que la implementación de mejoras en los sistemas tribológicos derivará en la utilización más eficiente de la energía utilizada en el funcionamiento de maquinaria, incluyendo motores de combustión interna, ya que la fricción es la principal causa de disipación de energía. Hoy en día se destina una gran cantidad de recursos a nivel mundial para contrarrestar de una u otra forma los efectos provocados por la fricción, por lo que al controlar los efectos que provoca este fenómeno se tendrán grandes ahorros energéticos [4].

Por lo anterior es que se justifica que a lo largo de los años el progreso en el estudio de la tribología ha sido bastante amplio y uno de los principales campos de aplicación de esta disciplina es prueba de ello; el gran avance tecnológico en los motores de combustión interna utilizados en la industria automotriz sin duda ha ido de la mano con la tribología. Un ejemplo de ello se puede evidenciar a partir de la comparación entre los cuidados que se recomiendan para un automóvil construido en los últimos diez años con los descritos en el manual de propietario de un Maxwell¹ 1916 [5].

En el caso del Maxwell 1916 las recomendaciones relacionadas con la lubricación para que el automóvil continuara su funcionamiento eran las siguientes:

¹ Marca predecesora de Grupo Chrysler

- Todos los días o cada 100 millas:
 - Checar el nivel de aceite en el motor, embrague y engranes del diferencial.
 - Girar la tapa de los contenedores de grasa de los 8 pernos de los resortes.
 - Aplicar aceite de motor a las rotulas de la dirección.
 - Aplicar aceite de motor a las varillas de las horquillas.
 - Aplicar aceite de motor al ventilador central.
 - Girar el contenedor de grasa del soporte del ventilador (una vuelta).

- Cada semana o cada 500 millas:
 - Aplicar aceite para motor a los soportes de ejes transversales.
 - Aplicar una cantidad suficiente de aceite para motor a todas las horquillas de los frenos, depósitos de aceite y soportes de ejes transversales.
 - Cambiar el lubricante de la junta universal.
 - Aplicar suficiente aceite para motor al sistema de encendido.
 - Llenar el recipiente de aceite para la columna de dirección.
 - Girar el recipiente de lubricante del eje del generador (una vuelta).
 - Engrasar las rotulas del sistema de dirección.
 - Aplicar aceite para motor a las partes del velocímetro.

- Cada mes o cada 1500 millas:
 - Cambiar el lubricante del motor.
 - Cambiar el lubricante del sistema de dirección.
 - Aplicar aceite 3 en uno a los rodamientos magnéticos.
 - Engrasar los centros de las ruedas.
 - Girar el recipiente de lubricación del eje trasero (dos vueltas).

- Cada 2000 millas.
 - Drenar el cárter, enjuagarlo con queroseno y rellenarlo.
 - Drenar el recipiente de líquido del embrague, enjuagarlo con queroseno y rellenarlo.
 - Drenar la transmisión, enjuagarlo con queroseno y rellenarlo.
 - Drenar el recipiente de lubricación del eje trasero, enjuagarlo con queroseno y rellenarlo.

En aquellos años era raro que un automóvil funcionara correctamente por más de 25000 millas, o que pudiera mantener una velocidad de 40 mph durante un pequeño periodo de tiempo; esto en gran medida por las altas tasas de desgaste que se presentaban en la mayoría de los componentes [5].

Desde 1916 a la fecha se han logrado grandes avances en la industria automotriz, todos ellos como producto de grandes esfuerzos en diversas disciplinas que se relacionan con la tribología.

- Hoy en día los lubricantes tienen una viscosidad más uniforme, algunos constituyentes químicos dañinos han sido removidos y otros benéficos se han añadido.
- Los combustibles son cuidadosamente formulados para prevenir pre-ignición, obstrucción de orificios en el sistema de alimentación de combustible o excesiva evaporación.
- Los materiales de los cuales están hechos los cojinetes se han desarrollado para soportar pérdidas momentáneas en la lubricación o sobrecargas.
- Las tolerancias en la manufactura están muy bien controladas con la finalidad de tener productos más uniformes y mejores acabados superficiales.
- El procesamiento de todos los materiales ha mejorado para contar con productos homogéneos y una gama más amplia de materiales: metales, polímeros o cerámicos.
- Los sellos en los ejes han mejorado considerablemente.

Los avances se han presentado en todas las áreas de la industria automotriz, pero no simultáneamente. Los fabricantes enfocan su atención principalmente en resolver problemas urgentes, dejando otros para el futuro.

Muchos intentos se han hecho para unificar los enfoques dados al estudio de la tribología. Sin embargo, hoy en día persiste una serie de divisiones las cuales se presentan en los libros y artículos relativos a esta disciplina los cuales dependen de la orientación de la institución académica que los publica. Actualmente las cuatro principales áreas de estudio involucradas en la tribología son las siguientes.

- 1- Mecánica de sólidos. Se enfoca principalmente en el desarrollo matemático de los campos de esfuerzos provocados por el contacto entre superficies. Los investigadores que hacen énfasis en esta disciplina publican modelos muy detallados de fricción y desgaste de ciertos dispositivos mecánicos los cuales se basan en mecanismos físicos y tribológicos muy básicos.
- 2- Mecánica de fluidos. Se enfoca en el desarrollo matemático del comportamiento de lubricantes. El trabajo en esta área es muy avanzado ya que se requieren modelar la interacción que se presenta entre dos superficies involucrando aspectos reológicos, viscosos, térmicos y de rugosidad.
- 3- Ciencia de materiales. Estudia los mecanismos microestructurales y atómicos por los cuales las superficies sólidas sufren degradación o alteraciones durante el contacto y deslizamiento. El trabajo en ésta área es usualmente presentado en forma de micrografías, así como espectros energéticos, electrónicos y de difracción de rayos X de superficies previamente sometidas a un proceso de desgaste.

- 4- Química. Enfoca su estudio en la reactividad que existe entre lubricantes y superficies sólidas.

El trabajo en cada una de estas áreas es muy detallado y completo; todas requieren de años de intensa preparación académica [6].

Debido a la gran necesidad de que el avance en el estudio de la tribología sea continuo, Spikes [7] ha planteado que en el año 2013 será inevitable recurrir a herramientas que desde hace tiempo se tienen a la mano, ya que basado en las tendencias de los investigadores, actividad tecnológica, oportunidades y necesidades; cinco áreas presentarán la mayor cantidad de avance en el estudio de la tribología.

- a) Modelado y simulación.
- b) Películas delgadas de lubricantes.
- c) Tecnologías eficientes en cuestiones energéticas.
- d) Diseño de superficies basadas en desarrollo científico.
- e) Sistemas inteligentes.

Lo anteriormente descrito ha motivado al desarrollo del presente trabajo el cual contiene una estructura que consta de siete capítulos cuyo contenido se describe brevemente a continuación.

En el primer capítulo del presente trabajo se muestra un breve panorama a manera de introducción sobre la importancia del estudio de materiales con aplicaciones tribológicas, así como su influencia a nivel industrial y económico. También se describe de manera resumida y concisa la relación que la tribología tiene con algunas disciplinas que forman parte del campo de estudio de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, así como de la Ingeniería Mecánica.

En el segundo capítulo se exponen algunos conceptos básicos sobre tribología, en esencia se muestra un breve panorama de los tres fenómenos que esta ciencia estudia, es decir: fricción, desgaste y lubricación. Posteriormente se presenta un resumen relativo al funcionamiento y características deseadas en los cojinetes de deslizamiento, así como los materiales que históricamente se han utilizado para la fabricación de los mismos. El estudio de las tribocapas es parte fundamental del presente trabajo, por lo que en este segundo capítulo se presentan de forma concisa. Finalmente, se expone una breve parte teórica relativa a la medición de dureza, microdureza, indentación instrumentada y medición experimental de esfuerzos mediante deformaciones.

El capítulo tercero describe el procedimiento de modelado experimental y de simulación que se utilizó tanto en el diseño del dispositivo instrumentado para la medición de deformaciones como para la simulación del ensayo tribológico aplicado a la aleación

sometida a estudio. En este capítulo también se explica a detalle el proceso de diseño y fabricación del dispositivo instrumentado mediante el cual fue posible la medición de deformaciones con la finalidad de aplicar las cargas previamente establecidas. También se detalla paso a paso el procedimiento experimental que se siguió para caracterizar tribológica y mecánicamente la aleación SAE 783.

Los resultados obtenidos a partir del ensayo tribológico se presentan en el capítulo cuarto. También se muestran los resultados de la caracterización tribológica y mecánica, así como de la simulación mediante el método de elementos finitos. En este capítulo se hace énfasis en el proceso de generación y observación de tribocapas mediante microscopía electrónica de barrido.

En el capítulo quinto y a manera de discusión se realiza un análisis de lo observado durante el ensayo tribológico, también se le da una interpretación a los resultados obtenidos de la caracterización mecánica, tribológica y microestructural que han sido mostrados en el capítulo cuarto.

Por último, en el capítulo sexto se presentan las conclusiones generales de la tesis y algunas sugerencias para la continuación de la investigación que aquí se presenta.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Tribología

La palabra tribología proviene del griego “τριβος” tribos que significa frotar, por lo que la traducción literal al castellano sería “la ciencia del frotamiento” [3]. Sin embargo, en español e inglés se define tradicionalmente como la ciencia que estudia los fenómenos relativos a la fricción, desgaste y lubricación. Hoy en día se considera a la tribología como la ciencia y tecnología que estudia el comportamiento de superficies que interactúan con movimiento relativo entre sí [8]. La tribología es crucial en el desarrollo y aplicación de maquinaria ya que invariablemente ésta se constituye de componentes tribológicos cuyo comportamiento es de suma importancia para la rentabilidad y eficiencia de toda máquina [9].

2.1.1 Fricción

La fricción, normalmente definida como resistencia al deslizamiento entre dos cuerpos rígidos, ha sido materia de estudio desde hace muchos años debido a su gran importancia desde el punto de vista práctico ya que es la causa por la que se presentan grandes pérdidas energéticas en los mecanismos donde se involucran procesos de deslizamiento. Sin embargo, la fricción también es la causa de muchos eventos necesarios en la vida cotidiana o en la industria tales como la transmisión de potencia, frenar un desplazamiento o el simple hecho de caminar [10, 11].

El interés que el ser humano ha tenido por la fricción data de la prehistoria. Probablemente la primera aplicación práctica que se le dio a este fenómeno fue la obtención de fuego a partir del incremento de temperatura que se presenta al frotar dos objetos. La segunda aplicación seguramente fue el intento de reducir la fricción que se presentaba al arrastrar materiales [12]. Sin embargo, el estudio moderno de la fricción data de la época en que Leonardo da Vinci planteó las bases de lo que posteriormente se conocería como las dos leyes básicas de la fricción al enunciar lo siguiente:

“la fricción aumenta al doble si el peso se incrementa al doble”

“la fricción producida por el mismo peso será la misma al inicio del movimiento aunque la longitud de contacto entre los materiales sea diferente”

Posteriormente el ingeniero francés Amontons en 1699 formuló los enunciados que hoy conocemos como las dos leyes básicas de la fricción.

1. La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal aplicada.
2. La fuerza de fricción no depende del área aparente de contacto.

Las observaciones de Amontons fueron verificadas por Coulomb en 1781, además de que planteó una distinción entre la fricción estática que es la que se opone al inicio del deslizamiento y la fricción cinética la cual es necesario vencer para continuar el deslizamiento. Coulomb observó que la fricción cinética es menor que la fricción estática e independiente de la velocidad de deslizamiento, lo cual es considerado como una tercera ley.

3. La fuerza de fricción cinética no depende de la velocidad y es menor que la fuerza de fricción estática [13, 14].

La fricción comúnmente se describe en términos de un coeficiente normalmente representado por μ el cual es la relación entre la fuerza de fricción, F , y la carga normal, N :

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2.1)$$

La fuerza de fricción es la fuerza tangencial que debe ser superada para que un cuerpo sólido deslice sobre otro [15].

El estudio del fenómeno de fricción puede dividirse de acuerdo a los mecanismos que lo generan.

- Fricción por adhesión. Una de los más importantes componentes de la fricción; se origina a partir de la ruptura de los enlaces que provocan adhesión en las intercaras. El estudio de la fricción por adhesión se enfoca principalmente en analizar y explicar la naturaleza de la interacción adhesiva que se presenta en metales con prácticamente nula rugosidad. La presencia de cualquier tipo de lubricante interrumpe la unión entre las intercaras disminuyendo dramáticamente la magnitud del componente adhesivo de la fricción.

- Fricción por asperezas. Este componente de la fricción se presenta cuando hay una diferencia considerable entre el valor de la dureza de las superficies que se encuentran en contacto, además de que las superficies deben tener movimiento relativo entre ellas ya que el metal más duro hace surcos en el más suave. Bajo ciertas circunstancias la fricción por asperezas puede representar un componente significativo del valor total de la fricción. Este comportamiento puede ser provocado por asperezas en la superficie o por partículas duras presentes en la zona de contacto.
- Fricción por deformación. Cuando dos cuerpos en contacto tienen movimiento relativo entre sí y se deforman se disipa energía mecánica. Un enfoque para cuantificar el efecto de la fricción por deformación es suponer que el trabajo realizado por la deformación plástica durante el deslizamiento de las superficies es igual al trabajo por fricción [6]

2.1.2 Lubricación

La lubricación, en su sentido general, es la aplicación de un medio (gas, líquido o sólido) en alguna zona donde por las condiciones de operación se espera fricción y desgaste. El objetivo principal de la lubricación es reducir los esfuerzos cortantes entre superficies sólidas, lo que se logra mediante la separación de las superficies en movimiento [16]. El estado de esfuerzos entre dos superficies en contacto con movimiento relativo entre sí normalmente excede el valor del esfuerzo de fluencia en materiales dúctiles o el de fractura en materiales frágiles; es importante mencionar que el área real de contacto es aproximadamente 0.01% del área aparente de contacto, por lo que dicho estado de esfuerzos no afecta significativamente el desempeño del elemento. Sin embargo, cuando no se tiene una adecuada lubricación la energía mecánica aplicada es absorbida por el elemento mediante transferencia de calor y se puede llegar a presentar deformación plástica [5].

La lubricación mediante películas de fluidos es indispensable para garantizar largos periodos de buen funcionamiento en elementos de máquina que son sometidos a regímenes de altas velocidades, tal como sucede en los cojinetes de deslizamiento; en el caso de mecanismos de baja velocidad es adecuada la utilización de grasas ya que un sistema para la correcta circulación de un lubricante líquido no resulta económico. Se utilizan lubricantes sólidos en aplicaciones a alta temperatura o con extremas condiciones de contacto y normalmente con cortos periodos de funcionamiento [4].

Es importante destacar que la lubricación no sólo involucra los fenómenos que ocurren dentro de la zona de posible contacto sino todo el sistema de alimentación, recirculación y presurización de los lubricantes, así como las características químicas, mecánicas y térmicas de los mismos [3].

La lubricación en cojinetes de deslizamiento se puede aplicar de las siguientes formas:

- Retención del fluido en la zona deseada por efecto de la tensión superficial. El líquido lubricante se coloca sobre una superficie plana, posteriormente otra superficie plana se coloca sobre la superficie previamente lubricada. Parte del líquido será expulsado, pero no todo; la tensión superficial evitará que todo el líquido salga de la zona de interés. La cantidad de lubricante que será retenida en la zona de mayor holgura entre ambas superficies depende de la humectabilidad que existe entre el lubricante y el material de las mismas.
- Lubricación hidrostática. Dos superficies que se encuentran en movimiento relativo entre sí pueden ser separadas mediante el bombeo de lubricante a presión suficiente para separar ambas superficies y de esta manera evitar el contacto. Este método de lubricación es eficaz ya que la separación entre las superficies depende del volumen del líquido bombeado. Sin embargo, hay que tomar en cuenta las dimensiones necesarias y el costo de la colocación y funcionamiento de la bomba.
- Lubricación hidrodinámica. Si una superficie desliza a través de otra dentro de un rango de velocidades específico, y la geometría del espacio que separa ambas superficies permite que el lubricante se transporte a través del espacio entre ellas, ambas se separarán y deslizarán fácilmente, en ese momento se ha logrado la lubricación hidrodinámica. [5]

2.1.3 Desgaste

El desgaste ha sido definido como el fenómeno de remoción de material de una superficie debido a la interacción con otra superficie de acoplamiento. Casi todos los elementos de maquinaria pierden su durabilidad y rentabilidad debido al desgaste, además de que la posibilidad de diseñar maquinaria avanzada se ve muchas veces limitada debido a las consecuencias de este fenómeno [18].

El desgaste es resultado de remoción de material debido a microfracturas, disolución química o por fundición al contacto en la intercara [19]. Por otra parte, se pueden mencionar varios mecanismos de desgaste: adhesivo, abrasivo, por fatiga y corrosivo. El modo dominante de desgaste puede cambiar de uno a otro por razones que incluyen cambios en las propiedades de la superficie del material o respuestas transitorias en la superficie que se derivan del incremento de temperatura provocado por la fricción o formación de películas delgadas de compuestos químicos. En general, el fenómeno de desgaste no se lleva a cabo a partir de un solo mecanismo por lo que es importante comprender cada uno de ellos [5].

- Desgaste por adhesión. Si en la intercara entre dos superficies bajo contacto se presentan enlaces lo suficientemente resistentes para no permitir el deslizamiento de una superficie sobre otra se tendrá deformación plástica debido a las dislocaciones en la zona de contacto. Como resultado de dicha deformación se tendrá el inicio de una grieta, así como su propagación. Cuando la grieta llega a la intercara de contacto se forma una partícula y el mecanismo de desgaste por adhesión se ha completado. La formación de partículas por desgaste adhesivo sigue un número bien definido de pasos [6]:
 - i. Deformación de las asperezas en contacto.
 - ii. Remoción de la superficie formada por las asperezas.
 - iii. Formación de uniones adhesivas.
 - iv. Rompimiento de las uniones y transferencia de material.
 - v. Modificación de los fragmentos transferidos.
 - vi. Formación de partículas “seltas”.

- Desgaste por abrasión. Si en la intercara entre dos superficies se tienen partículas sueltas podría removerse un volumen de material y se formarían surcos abrasivos en la superficie más blanda; a este comportamiento se le llama desgaste por abrasión [18]. En el caso del desgaste abrasivo se tiene una estrecha relación entre las propiedades del material y su resistencia al desgaste[6]

- 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 [18]. La formación de partículas derivadas del desgaste por fatiga sigue un número bien definido de pasos [6]:
 - i. Transmisión de esfuerzos en los puntos de contacto.
 - ii. Formación de grietas y propagación de las mismas.
 - iii. Generación de las partículas de desgaste.

- Desgaste por corrosión. Cuando se tiene deslizamiento, especialmente sobre líquidos o gases corrosivos, los productos de la reacción se forman en la superficie principalmente por interacciones químicas o electroquímicas. Si estos productos de la reacción se adhieren fuertemente a la superficie generan una capa protectora que si llega a desprenderse desgastaría el material [18].

Lo anteriormente descrito se muestra en el esquema de la Figura 2.1.

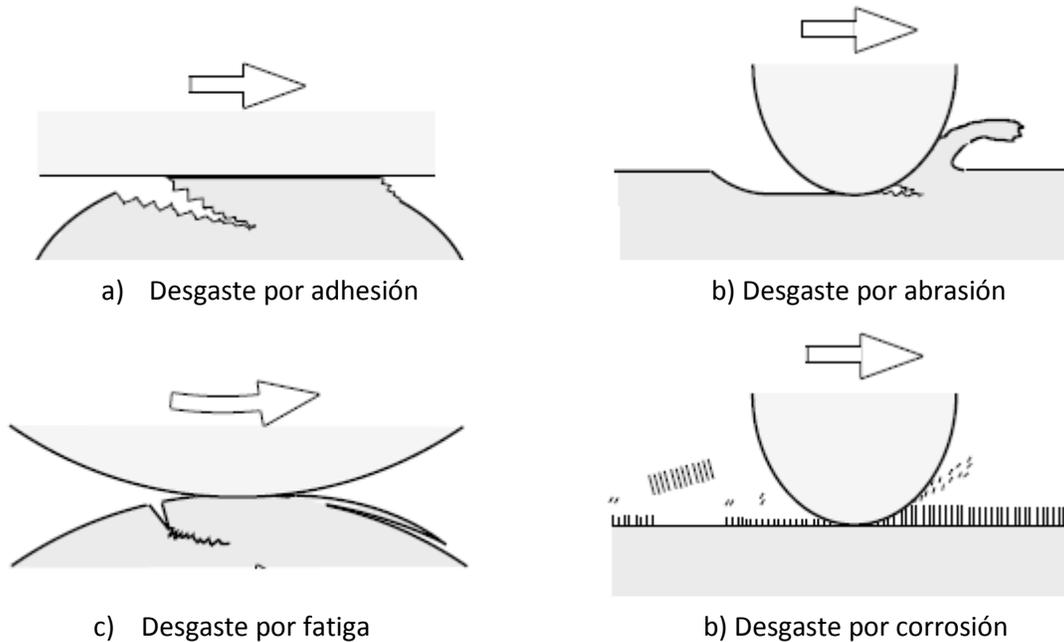


Figura 2.1 Imágenes esquemáticas de los cuatro mecanismos de desgaste [18].

La remoción de material en desgaste adhesivo, abrasivo o por fatiga se caracteriza por la deformación y fractura en la región de contacto donde los tipos de fractura pueden ser: frágiles, dúctiles o por fatiga. Debido a que la deformación y fractura son generadas a partir de deformaciones y esfuerzos, este tipo de desgaste es conocido como desgaste mecánico.

En el desgaste por corrosión la remoción de material se lleva a cabo a partir del desarrollo o disolución de películas de fluido en la zona de desgaste donde las reacciones químicas son activadas y aceleradas a partir de deformación y calentamiento productos de la fricción, microfraztas y la sucesiva remoción de productos derivados de la reacción. Este tipo de desgaste es generalmente conocido como desgaste químico.

2.1.3.1 Evaluación del proceso de desgaste

Técnicas comúnmente utilizadas en la evaluación de procesos tribológicos son la medición del cambio en el peso y en las dimensiones del elemento sometido a contacto. La medición del cambio en el peso puede complicarse si el volumen removido es pequeño en relación al volumen total del elemento. La identificación de mecanismos de desgaste y daños en la superficie es parte importante de una prueba tribológica y es conveniente que sea complementada con la estimación cuantitativa de valores de fricción y desgaste, por lo que la utilización de técnicas microscópicas y topográficas se vuelve parte integral del proceso de evaluación [20].

La medición cuantitativa o cualitativa de desgaste generada en un proceso ha sido objeto de una gran cantidad de enfoques. Uno de ellos es considerar la cantidad de desgaste que se ha presentado. Si durante el proceso se tienen grandes cantidades de desgaste entonces la medición del mismo puede realizarse mediante técnicas simples y poco costosas. De manera alternativa; si la cantidad de desgaste es poca, entonces es necesaria la utilización de métodos que proporcionen mayor sensibilidad en la medición, los cuales normalmente son costosos [21]. Algunos métodos para la determinación del cambio de volumen o masa durante un proceso donde se presente desgaste se mencionan a continuación.

- Determinación del cambio de masa. Se realiza mediante la medición del cambio de masa del objeto sometido a desgaste. Es necesario pesar el objeto antes y después con la finalidad de determinar si se ha removido o añadido material durante el proceso de desgaste. En muchas ocasiones se requiere de la utilización de equipos de alta precisión ya que en frecuentemente el cambio de masa es prácticamente imperceptible, además de que el espécimen debe encontrarse bastante limpio para que factores externos no intervengan en los datos obtenidos. La cantidad de desgaste puede ser descrita por el cambio total de masa durante el proceso o por la relación de masa desplazada o añadida por unidad de tiempo.
- Mediciones lineales de desgaste. Una alternativa común a la medición del cambio de masa durante el desgaste es la medición de cambios dimensionales. Frecuentemente en el diseño de componentes se especifica un límite de cambio en las dimensiones provocado por desgaste antes de que dicho componente pueda provocar fallas en el sistema; en estos casos es común monitorear el espesor de los componentes.
- Mediciones de área. Ciertas geometrías provocan que durante el contacto y desgaste se tengan pérdidas de material en un área específica de ambas superficies. En muchos casos estas áreas pueden ser medidas y son proporcionales a la cantidad de desgaste. Si la curvatura de la superficie es conocida, entonces la cantidad de desgaste puede ser cuantificada con base en el área desgastada.
- Medición de volumen. En una gran cantidad de reportes donde se incluyen mediciones de desgaste las unidades utilizadas corresponden a volumen, esto permite comparar el desgaste entre materiales cuyas densidades son diferentes. Un método para la medición del cambio de volumen durante un proceso de desgaste es la obtención de perfiles tridimensionales de la zona de contacto de los cuales es posible calcular mediante métodos numéricos la cantidad de volumen desplazado o añadido.[21]

2.1.4 Ensayos tribológicos

El propósito de una prueba tribológica es en gran medida incrementar el conocimiento fundamental y general del comportamiento de los materiales utilizados en aplicaciones tribológicas específicas.

Los ensayos tribológicos pueden realizarse en gran variedad de formas las cuales no están relacionadas solamente con el par de materiales que se someten a estudio, sino también al sistema mecánico en el que serán utilizados [20].

El comportamiento tribológico de un par de materiales dentro de un sistema puede ser evaluado dependiendo del grado de realismo requerido, propiedades y condiciones a evaluar, además de los recursos humanos y económicos de los que se dispone. Así por ejemplo, si lo que se desea evaluar es el comportamiento tribológico del sistema cilindro - pistón en un motor de combustión interna de un automóvil se podrían realizar pruebas de campo donde se ponga en funcionamiento el automóvil completo bajo condiciones realistas de operación. Sin embargo, el automóvil completo también puede ser evaluado en un banco de pruebas con lo que se mejoraría el grado de control durante el ensayo. Con el propósito de reducir costos, puede evaluarse solamente un subsistema, el cual en este caso sería el motor del automóvil y así poder tener un mayor control de la prueba en un laboratorio. Para simplificar aún más se pueden evaluar sólo los componentes importantes del motor, tomando en cuenta que aunque la prueba de componentes puede ser muy bien controlada, dejarían de tomarse en cuenta aspectos claves del funcionamiento del sistema los cuales sí es posible tener presentes en una prueba de campo o en una prueba de banco con el auto completo. Para incrementar la eficiencia y el grado de control sobre las condiciones del ensayo se puede utilizar una prueba de componentes simplificada o un modelo completo de prueba puede ser utilizado. Finalmente, con un modelo de prueba simplificado es posible evaluar el comportamiento de una gran cantidad de materiales de una manera fácil, rápida, no muy costosa y bajo condiciones muy bien controladas (Figura 2.2) [21].

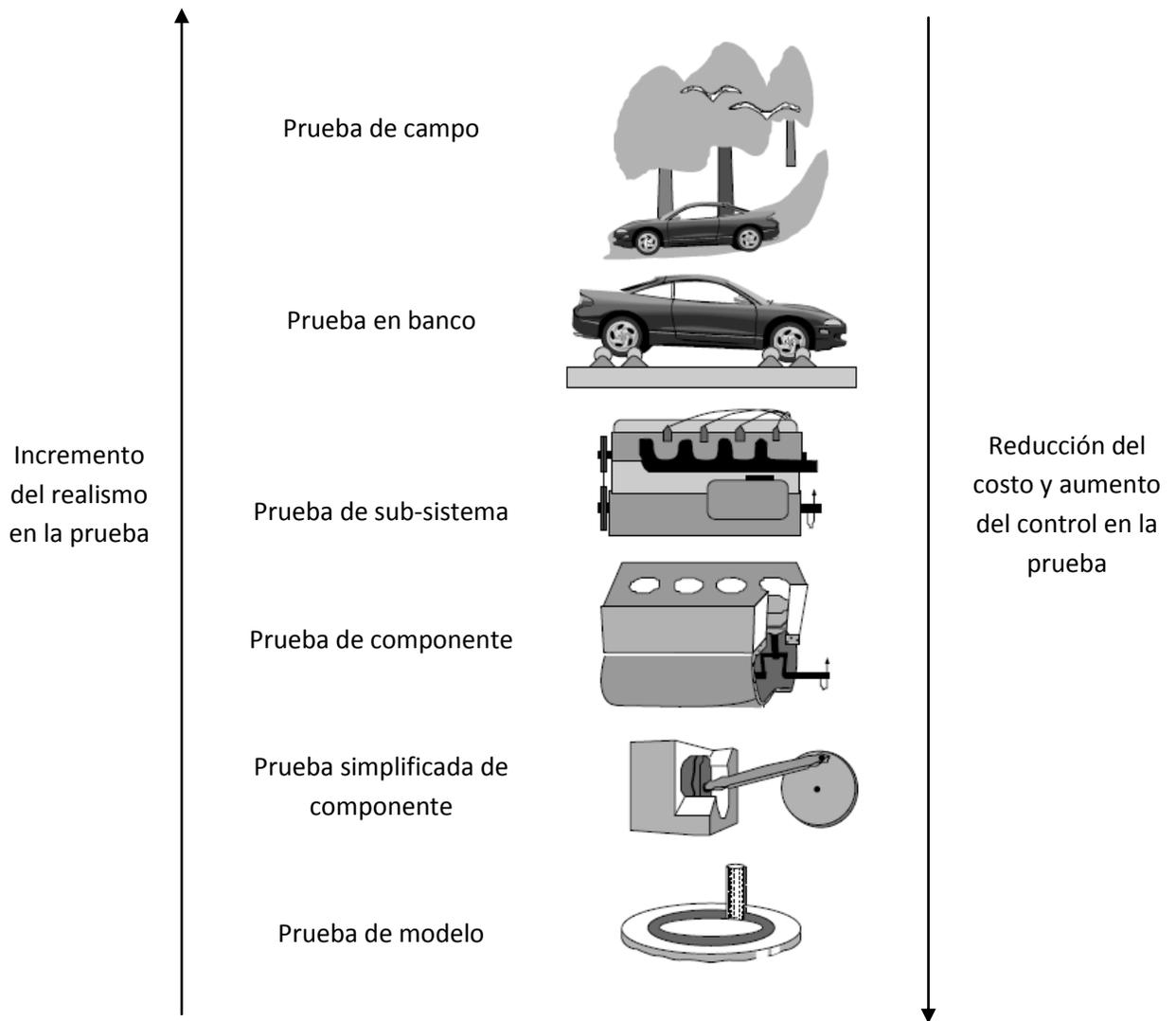


Figura 2.2 Clasificación de pruebas tribológicas tomando en cuenta el grado de realismo [21].

La anterior clasificación de pruebas tribológicas se enfoca en el deseo y necesidad de evaluar nuevos materiales o nuevos diseños para uno o dos componentes en maquinaria existente.

Las pruebas tribológicas también pueden ser clasificadas como abiertas o cerradas con respecto al tipo de contacto que se tiene. Si la superficie tribológica tiene una trayectoria cíclica, entonces es un sistema cerrado; por el contrario, si la trayectoria de deslizamiento se renueva constantemente, entonces se tiene un sistema abierto. Otra clasificación puede darse a partir del tipo de deslizamiento: unidireccional, recíproco o con condiciones de contacto. Algunas veces es conveniente distinguir entre pruebas donde se tiene deformación plástica o no [20].

Cabe destacar que es muy común que las pruebas modelo en laboratorios sean diseñadas con la intención de obtener rápidas tasas de desgaste mediante la exageración del contacto entre superficies, presión, velocidades de deslizamiento o combinaciones de las anteriores condiciones.

2.2 Materiales tribológicos

A los materiales que cumplen con los objetivos de la tribología y que por ende presentan ciertas características tales como reducir la fricción y el desgaste en aplicaciones donde hay contacto entre superficies, se les conoce como materiales tribológicos. Como es lógico, el estudio y la posterior designación de los materiales que tendrán aplicaciones tribológicas está completamente ligado al uso que se les dará, pues cada material presenta propiedades particulares que dependen de los elementos que lo conforman. Uno de los objetivos de la tribología que está estrechamente vinculado con la ciencia e ingeniería de materiales es precisamente el diseño y optimización de materiales tribológicos.

2.2.1 Cojinetes de deslizamiento

Un cojinete es un elemento de máquina que soporta a otro elemento que se encuentra en movimiento y es comúnmente conocido como eje, flecha o muñón. Se utilizan para permitir la transmisión de carga y par, además de reducir la fricción e inhibir el desgaste entre dos piezas que tienen movimiento relativo entre sí [22]. En este contexto hay que tomar en cuenta que al tenerse dos superficies en contacto y con movimiento relativo, se consume una cierta cantidad de energía al superar la resistencia a la fricción, además de que al tener contacto entre sólidos se presenta una situación de desgaste la cual puede traer como consecuencia la reducción de la vida útil del elemento o del sistema. Con el objetivo de reducir la fricción, el desgaste y en algunos casos un incremento excesivo de la temperatura provocado por la misma fricción, es común el uso de fluidos lubricantes. Los lubricantes utilizados para la separación del cojinete y la flecha normalmente son aceites

minerales, sin embargo no es poco común la utilización de aceites vegetales, base silicio o grasas [23].

En los motores de combustión interna comúnmente se utilizan cojinetes de deslizamiento cuyo régimen de lubricación es hidrodinámico. En este tipo de cojinetes las superficies de trabajo están completamente separadas una de otra por medio de una película de lubricante [23]. Durante el siglo XX el espesor de las películas lubricantes utilizadas en motores de combustión interna se ha reducido hasta llegar a ser de magnitud micrométrica. Particularmente en la industria automotriz se han logrado alcanzar espesores de menos de un micrómetro [24].

Cuando entre el cojinete de deslizamiento y la flecha se tiene una adecuada lubricación, es decir; se tiene una capa limpia de lubricante no corrosivo separando ambas superficies, el único requerimiento para el material del cojinete es que se tenga una adecuada resistencia y rigidez mecánica. Sin embargo, las condiciones normales de operación de los cojinetes distan mucho de ser las ideales y es por ello que las siguientes propiedades deben tomarse en cuenta al momento de seleccionar un material para ser utilizado en la fabricación de cojinetes de deslizamiento [23]:

- Resistencia mecánica. La máxima presión que debe soportar el cojinete de deslizamiento es considerablemente mayor que el promedio de la carga dividido entre el área proyectada. Por lo tanto, el material con el que se fabrican los cojinetes debe tener una alta resistencia mecánica a la compresión con la finalidad de prevenir un proceso de deformación plástica o fractura durante el funcionamiento del cojinete.
- Resistencia a la fatiga. El material con el cual se fabrican los cojinetes debe tener una alta resistencia a la fatiga para poder soportar cargas cíclicas sin que se generen grietas en la superficie.
- Conformabilidad. Es la propiedad del material del cojinete por la cual este se puede adaptar mediante deformación plástica o termofluencia a posibles deflexiones o inexactitudes en las dimensiones de la flecha sin la generación de calentamiento o desgaste excesivo.
- Incrustabilidad. Es la capacidad del materia para absorber pequeñas partículas ajenas al sistema y así evitar dañar el material de la flecha.
- Compatibilidad. En la fabricación de cojinetes de deslizamiento se deben utilizar materiales con los cuales se evite que durante el funcionamiento del motor el

material del cojinete y el de la flecha tiendan a sufrir desgaste adhesivo debido a altas presiones generadas en momentos de operación extrema.

- Resistencia a la corrosión. El material con el que se fabrican los cojinetes de deslizamiento no debe corroerse al interactuar con el fluido lubricante. Esta propiedad es de particular importancia en los motores de combustión interna donde el mismo aceite se utiliza para lubricar las paredes del cilindro y los cojinetes.
- Conductividad térmica. Una alta conductividad térmica permite que el material del cojinete disipe eficientemente el calor generado por la fricción.
- Bajo coeficiente de expansión térmica. Con la finalidad de que cuando el cojinete opere bajo un régimen extremo y la temperatura aumente no se modifiquen significativamente las dimensiones en la holgura del sistema.
- Punto de fusión. El material del cojinete debe tener un punto de fusión mayor a la temperatura de operación del motor y al de la película lubricante en cualquier condición de funcionamiento, de lo contrario el material comenzará a fundirse causando una falla en el sistema [25].

Como los cojinetes de deslizamiento actúan bajo condiciones de contacto se entiende que de los seis grados de libertad que tiene un cuerpo sólido, se elimina por lo menos uno. En general los cojinetes se diseñan de tal manera que permiten un solo grado de libertad, por ejemplo una translación en una dirección o una rotación alrededor de un eje fijo [9].

2.2.2 Materiales para cojinetes de deslizamiento

En el año 1839 comenzó un periodo de evolución de las aleaciones utilizadas en la fabricación de cojinetes de deslizamiento, esto debido a la aparición de los metales Babbit, los cuales están basados en el sistema Pb – Sn – Sb, el cual forma un eutéctico simple y que tiene solubilidad sólida limitada de ambos elementos en el otro [26]. Los Babbit o también llamados metales blancos poseen buena compatibilidad, incrustabilidad y conformabilidad. Sin embargo, su resistencia mecánica es baja. Cabe destacar que su resistencia a la corrosión va en función de la composición específica que se utilice, las aleaciones con un alto contenido de estaño presentan una excelente resistencia a la corrosión, no así las que tienen alto contenido de plomo [3].

Posteriormente se pudo observar que las aleaciones Cu - Pb cuentan con buena compatibilidad la cual se obtiene a partir del plomo, mientras que el cobre mejora la resistencia mecánica. Debido a que en un medio contaminado por azufre la resistencia a la

corrosión de este tipo de aleaciones no es buena, se acostumbra aplicar un recubrimiento electrolítico de Babbit en la superficie. Como este tipo de cojinetes se compone de una capa de Babbit sobre la aleación cobre-plomo y ésta se encuentra a su vez sobre un respaldo de acero se les conoce como trimetálicos. Este tipo de cojinetes son utilizados bajo condiciones severas de trabajo [3].

Debido a que por la Segunda Guerra Mundial las potencias del eje se veían limitadas en sus fuentes de cobre, éstas optaron por buscar una matriz resistente para contener un babbitt, utilizando aluminio y, mediante colaminado, fue posible producir los clásicos cojinetes de acero recubiertos con una capa de aleación tribológica. Las dos ventajas de las aleaciones de aluminio son: que se pueden producir por fundición seguida de un proceso termomecánico y su excelente resistencia a la corrosión que permite utilizarlas sin recubrimiento de babbitt. Una de las aleaciones de aluminio más utilizadas para la producción de cojinetes de deslizamiento son las Al – Sn; el proceso mediante el cual se obtiene la aleación funcional comienza con la fundición de lingotes delgados (10 – 30 mm), libres de porosidad y con distribución homogénea de estaño, seguido de un proceso termomecánico que permite la mejora de las propiedades mecánicas del lingote, posteriormente el material se colamina con una capa de aluminio de pureza industrial y se aplica un recocido. Finalmente el material se colamina con una cinta de acero [3].

Dependiendo de la aplicación que tendrán, los cojinetes de deslizamiento se han fabricado con muy diversos materiales a lo largo de la historia. A continuación se mencionarán algunos de los más importantes.

- *Aleaciones de aluminio.* Presentan buena capacidad de carga, resistencia a la fatiga, conductividad térmica, resistencia a la corrosión y bajo costo.
- *Metales porosos.* Son de metal sinterizado, tienen poros de interconexión en los cuales se almacena aceite con lo que se lubrica la superficie del cojinete.
- *Cojinetes de hierro fundido o acero.* Se utilizan para cargas relativamente pequeñas, su principal ventaja es el bajo costo. Tienen reducida incrustabilidad y conformabilidad por lo que se debe tener un muy buen alineamiento.
- *Polímeros.* Presentan buena compatibilidad, poco ruido en el funcionamiento y no hay corrosión. No es posible utilizarlos a altas temperaturas de operación [25].

A excepción de los cojinetes de plata, todos los materiales metálicos que se utilizan comercialmente para la fabricación de estos elementos de máquina son aleaciones que se componen de más de una fase [22].

2.3 Tribocapas

Los principales medios de disipación de energía en los elementos de máquina sometidos a contacto son: elevación de la temperatura, generación de desgaste y en algunas ocasiones un cambio en la estructura del material cercano a la superficie dando origen mediante deformación plástica severa a capas cuyo espesor se encuentra dentro de un rango de algunos cientos de nanómetros [28], dicho espesor depende de las condiciones del proceso de formación así como de la estructura del material sin deformar [29]. Cuando la formación de dicha capa se da mediante procesos tribológicos se le denomina tribocapa.

Una tribocapa es una capa de transferencia o auto transferencia que se genera a partir de un proceso de deformación plástica severa. Una capa de transferencia es la que se forma a partir de un proceso de deformación plástica donde se mezclan elementos de ambos componentes del tribopar, una capa de auto transferencia es la que se genera a partir de la mezcla mecánica y que se compone sólo de las fases previamente presentes en el material.

Cuando la compatibilidad tribológica entre el material de la flecha y el cojinete de deslizamiento previene la formación de una capa de transferencia es común que al operar bajo condiciones severas de carga en la superficie del cojinete se forme una capa de auto transferencia [30].

La formación tribocapas desde el punto de vista sub-estructural es claramente consecuencia de un proceso de deformación plástica severa el cual se caracteriza por la rápida acumulación de dislocaciones que disminuyen su energía acomodándose dentro de los límites de sub-grano. A grandes deformaciones, el diámetro del sub-grano disminuye cuando la desorientación de los sub-granos se incrementa y el espesor del límite de sub-grano se reduce. A cierto nivel de deformación la desorientación de los sub-granos es tal que aparecen límites de grano de ángulo largo marcando la transición continua entre un material altamente deformado y un material nanoestructurado. Para metales cúbicos centrados en la cara esta transición ocurre alrededor de deformaciones equivalentes de entre 4 y 6 lo cual sin duda lleva a la formación de la tribocapa [31]. Desde un punto de vista termodinámico la deformación del material y la excesiva energía superficial generan una fuerza impulsora que altera la microestructura a través de procesos difusivos provocando la formación de una fase fuera de equilibrio [32]

2.4 Dureza

El término dureza puede ser definido como la habilidad de un material para resistir deformación permanente al aplicar una carga mediante un indentador. Generalmente una prueba de dureza consiste en presionar en la superficie del material un indentador cuya geometría y propiedades mecánicas son conocidas. La dureza del material es cuantificada

utilizando una variedad de escalas que directa o indirectamente indican la presión de contacto en la superficie deformada [33,34]

2.4.1 Microdureza

Una prueba de microdureza se caracteriza porque la carga aplicada durante el ensayo es menor a 2 N, el valor asignado depende del tipo de indentador que se utilice, siendo el más común Berkovich [35], aunque el uso de indentadores Vickers y Knoop también es frecuente [36].

2.4.2 Indentación instrumentada

La utilización de la indentación instrumentada con la finalidad de obtener la respuesta mecánica de materiales que van desde metales hasta materiales biológicos ha ido en aumento gracias a los altos niveles de control, sensibilidad y cantidad de datos que ofrece esta técnica ya que se han desarrollado diversos métodos para la obtención de propiedades inherentes a cada material a partir de la curva de carga contra profundidad [37, 39]. En contraste a las pruebas tradicionales de medición de dureza, la indentación instrumentada permite la obtención de un historial de carga y profundidad aplicadas a lo largo de la prueba, además del control de las mismas [38]. La curva característica de carga contra profundidad obtenida a partir de la indentación instrumentada se muestra en la Figura 2.3, en ella se observa el comportamiento del material tanto durante la indentación como en la descarga [39].

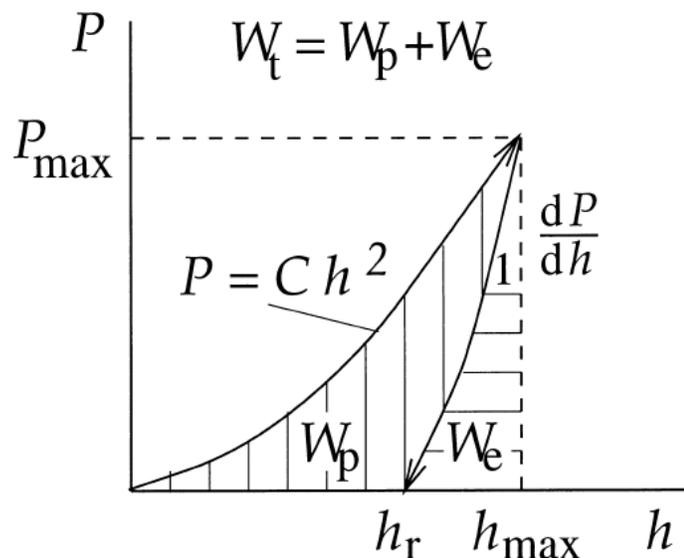


Figura 2.3 Curva típica de carga en función de la profundidad obtenida a partir de indentación instrumentada, en la figura también se muestra la nomenclatura del ensayo [39].

Durante el periodo de carga la respuesta del material usualmente obedece a la Ley de Kick [40]

$$P = Ch^2 \quad (2.2)$$

Donde C es la curvatura durante la carga; el exponente es característico de la geometría del indentador [38]. La máxima profundidad de indentación h_{max} ocurre cuando se tiene la máxima carga P_{max} , la pendiente de la curva de descarga es $\frac{dp}{dh}$ y se asocia con las propiedades elásticas del material. W_t es el término para representar el trabajo total realizado por la carga P durante la indentación, W_e es el trabajo elástico liberado durante la descarga y W_p representa al trabajo utilizado para deformar plásticamente el material.

$$W_t = W_p + W_e \quad (2.3)$$

El término h_r representa la profundidad residual de indentación después de la descarga [40].

2.5 Medición de deformaciones

Históricamente ha existido una amplia gama de sensores de deformación cuyo desarrollo se ha basado en principios mecánicos, ópticos, eléctricos, acústicos y neumáticos. Por sí sólo, ningún tipo de medidor de deformaciones, sin importar el principio en el que esté basado su funcionamiento cuenta con todas las propiedades requeridas para un sensor óptimo.

Algunas características requeridas en los sensores de deformación son las siguientes:

- La constante de calibración debe ser estable: no debe variar con respecto al tiempo, temperatura u otro elemento del entorno.
- El tamaño del sensor debe ser pequeño, de tal manera que la deformación en un punto pueda ser aproximada con el menor error.
- La respuesta del sensor debe permitir mediciones bajo un régimen dinámico de deformaciones cuya frecuencia exceda 100 kHz.
- El sistema de instrumentación del sensor debe permitir obtener lecturas sin necesidad de interferir en la prueba.
- La medición debe ser independiente de la temperatura y otros factores del entorno durante la prueba.
- El sensor debe ser fácil de instalar y de operar.
- El sensor debe mostrar respuesta lineal en un amplio rango.
- El sensor debe ser adecuado para ser utilizado en sistemas transductores donde cantidades desconocidas puedan ser medidas en términos de deformación.

La correcta selección del sistema de medición de deformaciones depende de los requerimientos y características del sistema previamente evaluado [23].

Actualmente y debido a sus características dimensionales, sensibilidad, rango de utilización, exactitud y precisión, además de la gama de posibilidades que ofrecen para ser utilizados en conjunto con sistemas que involucran otro tipo de transductores, la utilización de dispositivos eléctricos basados en el cambio de resistencia para la medición de deformaciones es ampliamente aceptado en la mayoría de campos de aplicación, principalmente en el de análisis de esfuerzos.

En 1856 Lord Kelvin se dio cuenta que la resistencia de alambres de cobre y hierro cambiaba conforme estos se deformaban; posteriormente Kelvin utilizó un puente de Wheatstone para medir el cambio en la resistencia. De esta manera fue posible establecer tres principios que han impulsado el uso de elementos electro – resistivos en la medición de deformaciones.

1. La resistencia del alambre cambia en función de la deformación.
2. Diferentes materiales tienen diferentes sensibilidades.
3. Es posible medir el cambio en la resistencia con exactitud mediante un puente de Wheatstone.

La mayoría de los sensores electro – resistivos utilizados hoy en día para medir deformaciones son fabricados con una aleación cobre – níquel conocida como *constantan* la cual es utilizada por las siguientes razones [41]:

- La sensibilidad a la deformación tiene un comportamiento lineal sobre un amplio rango.
- El valor de la sensibilidad a la deformación no cambia significativamente si el material se deforma plásticamente.
- La aleación tiene una alta resistividad.
- La aleación tiene una excelente estabilidad térmica y no varía apreciablemente cuando el material está montado en materiales comunes.
- Los pequeños cambios en la resistencia inducidos por la temperatura pueden ser controlados.

Capítulo 3. Desarrollo experimental

3.1 Diseño del dispositivo sensor

Como se ha mencionado en el prólogo, una parte significativa del trabajo fue el diseño del dispositivo con el cual se lograron medir las deformaciones generadas al aplicar la carga mediante el perno que posteriormente generaría desgaste en el material tribológico sometido a ensayo.

Al observar una inconsistencia en los resultados durante los ensayos tribológicos realizados al inicio de la presente investigación, se optó por revisar detenidamente el sistema de aplicación de carga y de sensores. El tribómetro coaxial fue diseñado inicialmente para poder realizar dos pruebas simultáneas, suponiendo que las cargas serían las mismas en ambas probetas, tal como se muestra en la Figura 3.1.

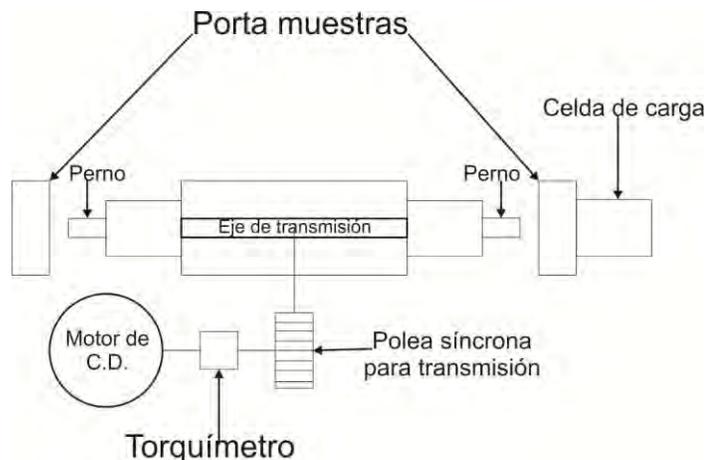


Figura 3.1 Esquema operacional inicial del tribómetro coaxial, se observa el montaje de dos pernos y dos probetas que se ensayan simultáneamente, además de que se mide con una sola celda de carga [42].

La celda de carga utilizada trabajaba a flexión, lo cual no permitía una medición directa de la fuerza normal aplicada. Para eliminar ese inconveniente se decidió instrumentar ambos portamuestras con galgas extensiométricas y así obtener las deformaciones de manera directa. Al medir las deformaciones en ambos portamuestras se pudo observar que eran diferentes para cada una de las probetas por lo que se optó por

cancelar uno los portamuestras y conservar sólo el que presentaba mayor rigidez estructural.

3.1.1 Fabricación del dispositivo sensor

Para aumentar la fiabilidad de los datos se decidió diseñar y fabricar un nuevo portamuestras que permitiese saber con seguridad que la carga se aplicaba al centro de la probeta. Para lograrlo, se optó por un modelo donde dos soportes circulares como los que se muestran en la Figura 3.2 fueran separados por tres vigas separadas 120° las cuales trabajan a compresión.

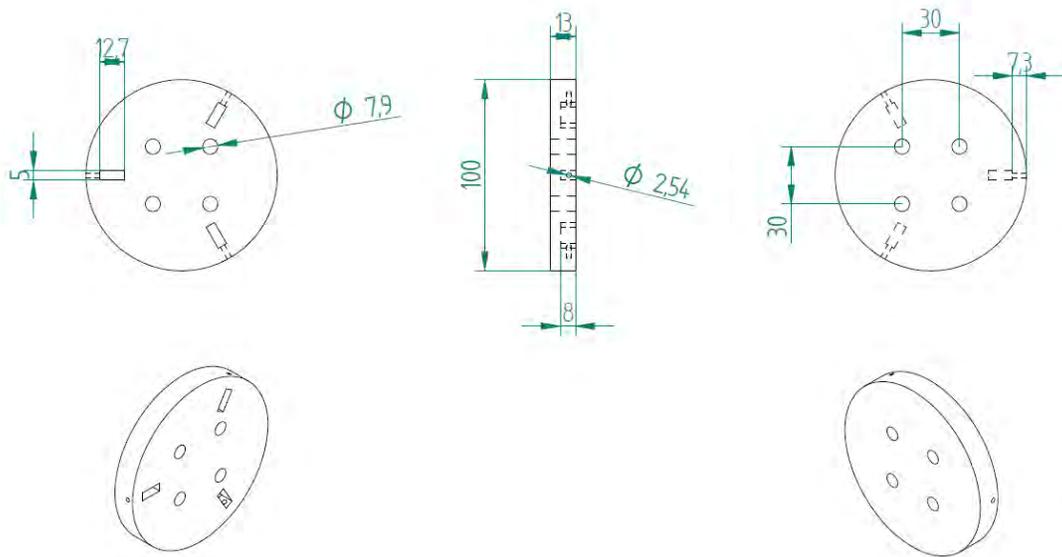


Figura 3.2 Dimensiones y geometría de los soportes utilizados en el portamuestras.

Debido a la rigidez estructural que gracias a su geometría proporcionan los portapernos, la deformación mediante la cual se obtuvo el valor de la carga se midió en las vigas de sección rectangular, mediante su instrumentación con galgas extensiométricas. En la Figura 3.3 se muestra el diseño final del dispositivo.

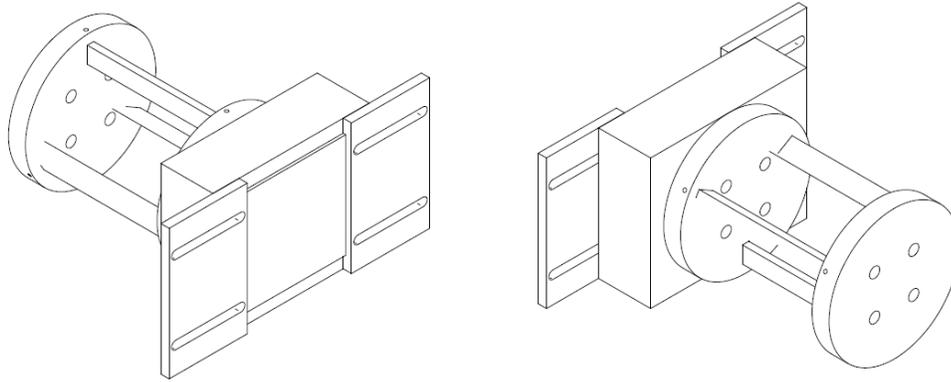


Figura 3.3 Diseño final del dispositivo mediante el cual se midieron cargas durante el ensayo tribológico.

Fue necesario maquinar los dos discos utilizando fresas de control numérico, las cuales proporcionan precisión de hasta 0.01mm. Las vigas se adaptaron realizando un ligero desbaste en los extremos el cual permitió que cada una de las piezas se adaptara a la perfección. La solidez en las uniones se obtuvo mediante tornillos “prisioneros” en cada viga. Todas las piezas se fabricaron con aluminio comercial aleación 6063 ya que este material proporciona la rigidez estructural deseada y menor densidad en comparación con el acero, además de que puede ser maquinado sin dificultad con el equipo con el que se cuenta. Cabe destacar que gracias al módulo de elasticidad del aluminio se puede minimizar el error relativo al medir deformaciones.

3.1.2 Modelado y simulación del dispositivo sensor

Previo a la fabricación del dispositivo se realizó un modelo que permitiese simular el comportamiento de cada elemento utilizando un *software* comercial de modelado mediante elementos finitos.

Las consideraciones tomadas en cuenta al realizar el modelo fueron las siguientes:

- Cada una de las piezas se consideró deformable.
- Se definió al aluminio como material elástico, esto mediante su módulo elástico y relación de Poisson.
- El tipo de interacción definido entre las piezas en contacto fue de empalme superficie – superficie.
- Se aplicó una carga normal de 100 N.
- Las condiciones de frontera fueron restricciones al desplazamiento y rotación (en los seis grados de libertad) en la superficie contraria a donde se aplicó la carga.

- El mallado se realizó utilizando elementos tridimensionales, aumentando la densidad de elementos en las vigas donde se midieron experimentalmente las deformaciones.

El resultado de la simulación fue satisfactorio ya que el valor de las deformaciones en la zona donde se colocaron las galgas extensiométricas fue completamente coincidente con lo esperado en el ensayo tribológico, tal como se muestra a continuación.

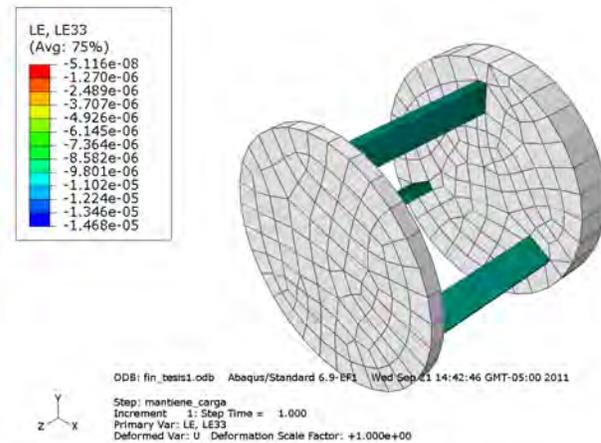


Figura 3.4 Resultado gráfico de la simulación mediante método de elementos finitos, se muestra la tabla de resultados de deformación verdadera en la dirección que se aplicó la carga.

En la Figura 3.4 se aprecia que en la zona donde se colocaron las galgas extensiométricas la deformación es de entre $-8.58e-6$ y $-9.8e-6$. Los resultados experimentales se muestran en la Figura 3.5.

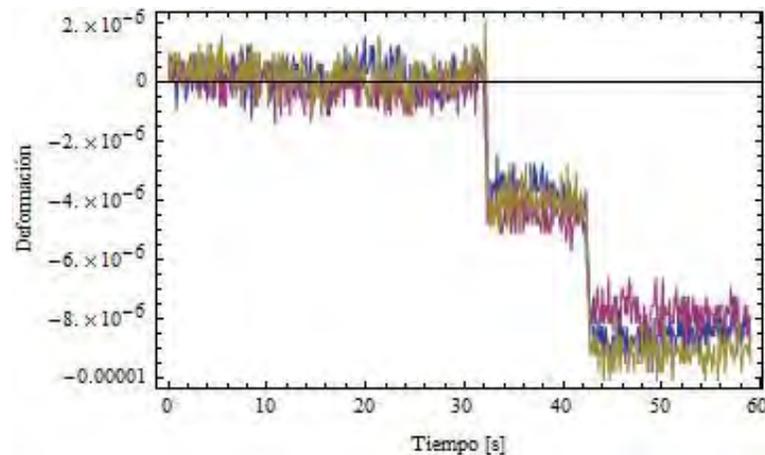


Figura 3.5 Datos experimentales obtenidos durante un ensayo.

Para corroborar los datos experimentales y realizar una comparación más precisa se tomaron de los resultados de la simulación tres nodos dentro de la zona donde se colocaron

las galgas extensiométricas y se graficó su historial de deformación verdadera a lo largo de la simulación. En la Figura 3.6 se muestran los resultados.

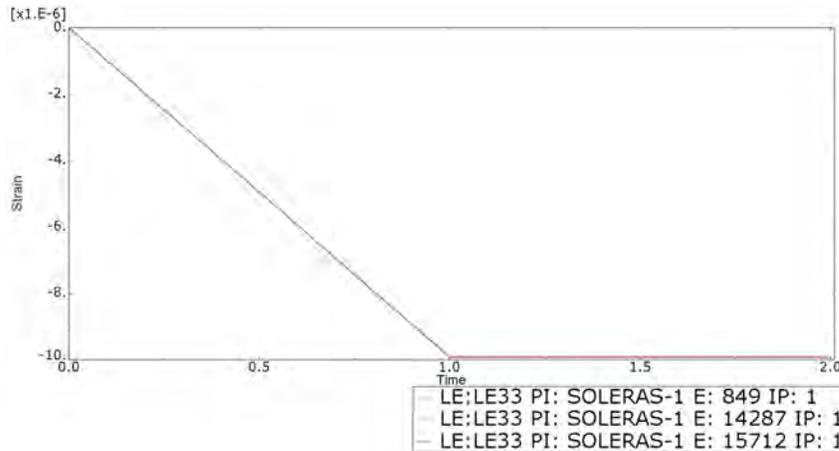


Figura 3.6 Resultado de la simulación para tres nodos.

3.2 Modelado del experimento

Con la finalidad de establecer parámetros de control durante el ensayo tribológico se utilizaron y acoplaron algunos modelos matemáticos a partir de los cuales fuese posible tener un marco de comparación que permitiese realizar un análisis debidamente fundamentado.

3.2.1 Modelo de dureza Brinell

A partir de este modelo se estableció la magnitud mínima de la carga normal que se aplicó durante cada uno de los ensayos tribológicos, esto con la finalidad de asegurar que la carga sería suficiente para generar deformación plástica en el material tribológico. La indentación Brinell es una prueba simple a partir de la cual se puede determinar la dureza de una amplia gama de materiales. La prueba consiste en la aplicación de una carga constante mediante un indentador esférico durante un determinado periodo de tiempo y así lograr deformar plásticamente el material del cual se desea obtener la dureza. Después de retirar la carga se mide el diámetro de la huella resultante con un microscopio de baja potencia [43].

El esfuerzo que se obtiene como respuesta a la aplicación de la carga normal se puede expresar de la siguiente manera.

$$\sigma = \frac{P}{\pi r_a^2} \quad (0.1)$$

Donde P es la magnitud de la carga normal aplicada y r_a es el radio de la huella generada a partir de la aplicación de dicha carga (Figura 3.7).

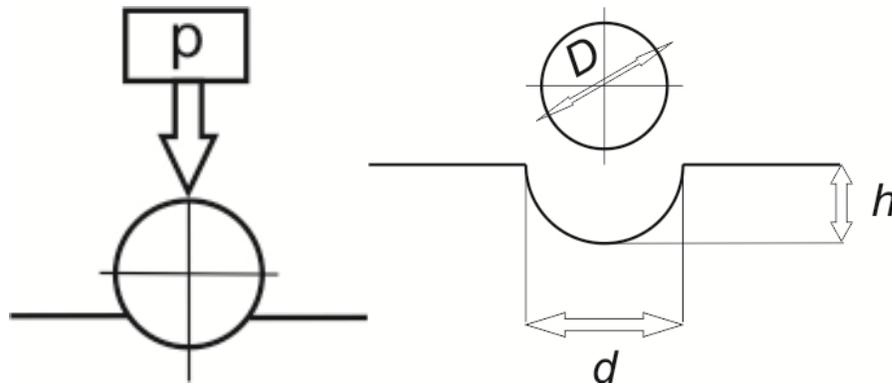


Figura 3.7. Esquemas representativos de indentación Brinell [43].

A partir del diámetro de la huella y los parámetros con los que se realizó la prueba se determina el valor de la dureza Brinell mediante la siguiente ecuación.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (0.2)$$

Donde HB es el valor de la dureza Brinell la cual se expresa en unidades de fuerza por unidad de área, P es la magnitud de la carga aplicada, D es el diámetro del indentador y d es el diámetro de la huella generada durante la prueba.

A partir de datos obtenidos experimentalmente se ha determinado el valor de la dureza Brinell para las aleaciones sometidas a ensayo tribológico, por lo que el valor de HB , D y P para condiciones estándar en este tipo de materiales es conocido, así el diámetro de la huella se puede calcular de la siguiente manera.

$$d = \sqrt{D^2 - \left(D - \frac{2P}{HB\pi D}\right)^2} \quad (0.3)$$

De esta manera es posible estimar el radio de deformación plástica generado a partir de la indentación.

Con los datos obtenidos a partir del cálculo anterior es posible realizar una estimación de la carga que se necesita aplicar para lograr deformar plásticamente el material tribológico. El parámetro a sustituir es el diámetro del indentador por el diámetro del perno utilizado en el tribómetro D_p ; así para el caso del ensayo tribológico la expresión para el cálculo de la carga es la siguiente [44]:

$$P = \frac{HB\pi D_p (D_p - \sqrt{D_p^2 - d^2})}{2} \quad (3.4)$$

3.2.2 Modelado por el método de elementos finitos

Con la finalidad de establecer otro parámetro de comparación y evaluación de los resultados obtenidos, se optó por simular mediante el método de elementos finitos el ensayo tribológico realizado en el presente trabajo. A continuación se exponen los parámetros y propiedades bajo las cuales se llevó a cabo dicha simulación.

En un primer modelo se consideró reproducir el ensayo tribológico realizado, por ello las geometrías e interacciones debían de ser las mismas que en el equipo utilizado y no las que se tienen en un cojinete utilizado en motores de combustión interna.

El modelo consistió de tres piezas: la primera fue el perno con el que se aplicó la carga y el proceso de desgaste; el radio del perno fue de 10 mm y un radio de curvatura de 200 mm. La segunda fue una placa cuadrada de acero de 40 mm de lado y 1 mm de espesor, la cual actúa como material de respaldo. El material utilizado para el modelado de ambas piezas fue acero, el cual se idealizó como un sólido elástico cuyo módulo de elasticidad fue de 200 GPa y una relación de Poisson de 0.29. La tercera pieza fue una placa cuadrada del material tribológico con las mismas dimensiones que la placa de acero previamente descrita; el material se idealizó como un sólido elasto – plástico con endurecimiento. La parte elástica se definió con un módulo de elasticidad de 68 GPa y una relación de Poisson de 0.33, las propiedades de la zona plástica se obtuvieron a partir de datos obtenidos en pruebas de tracción, cuya gráfica de la zona plástica se muestra en la Figura 3.8.

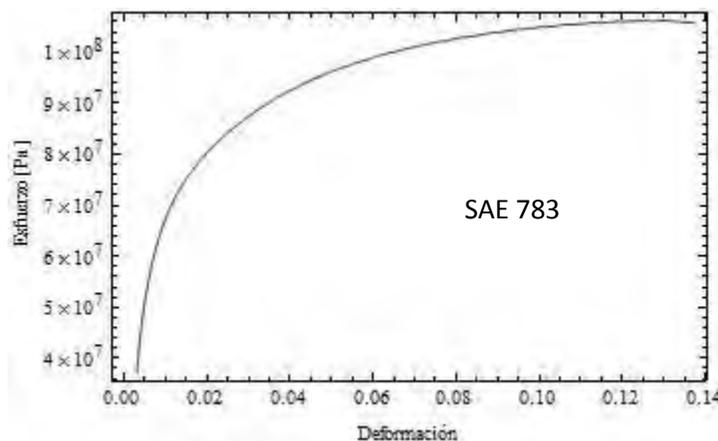


Figura 3.8 Curva representativa de la zona plástica con endurecimiento en la aleación SAE 783 con tratamiento térmico.

El mallado se realizó tomando en cuenta la importancia que para la presente investigación tiene la deformación en cada una de las piezas que conforman el modelo; así en el caso del perno, se aplicó un mallado no muy fino, haciéndose un poco denso en la zona que entra en contacto con el material tribológico[45] .

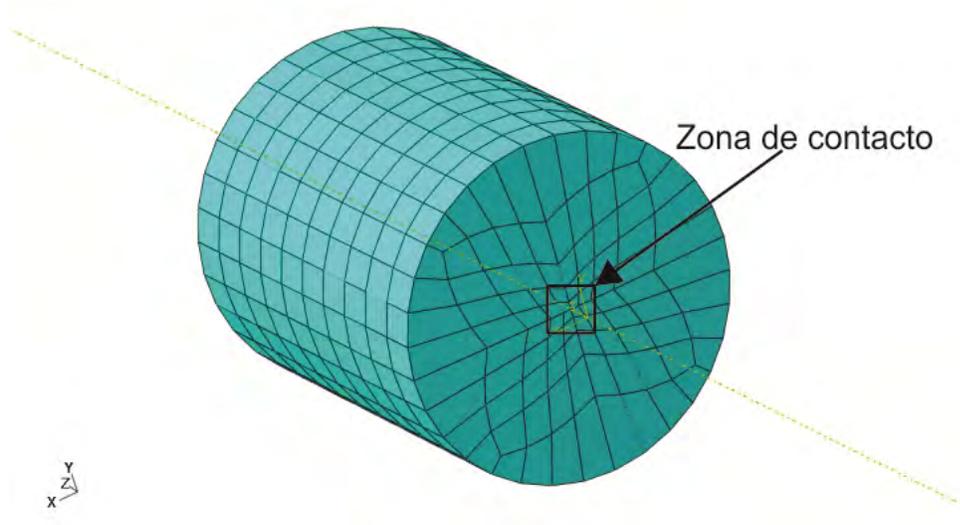


Figura 3.9 Mallado del perno de acero.

La placa de material de respaldo fue mallada de manera estructurada y poco fina ya que la deformación en esta pieza no es de vital importancia en el análisis.

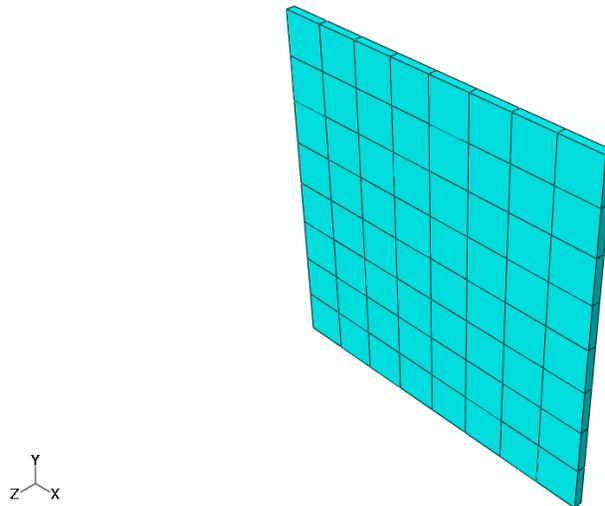


Figura 3.10 Mallado de la placa de acero.

A la placa de material tribológico se le aplicó un mallado fino, haciéndose sumamente denso en la zona que entra en contacto con el perno. Se utilizaron elementos estructurados resultando un total de 59500.

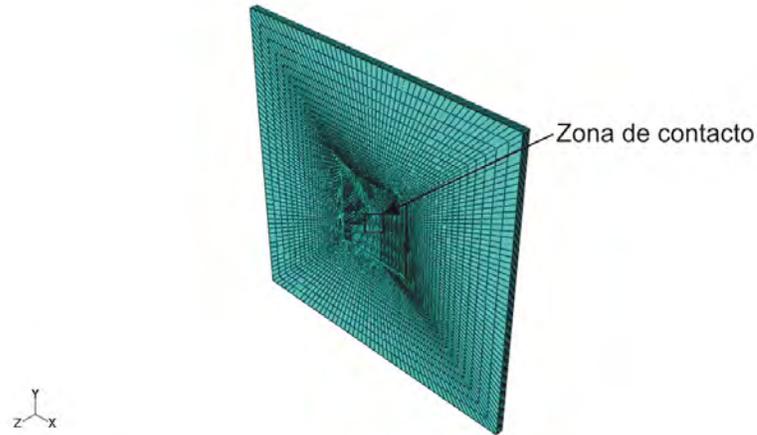


Figura 3.11 Mallado de la placa de material tribológico.

Las condiciones de frontera se aplicaron por un lado a la placa de acero, la cual se empotró restringiendo así cualquier desplazamiento o rotación. En el caso del perno se restringieron 4 de sus seis grados de libertad, permitiendo sólo desplazamiento en la dirección de aplicación de la carga y giro alrededor del eje z.

La interacción entre la placa de acero y de material tribológico fue un empalme entre superficies, en el caso del perno y la placa de material tribológico se definió un contacto superficie con superficie considerando un coeficiente de fricción de 0.38 [46].

Se aplicó una carga de 100 N y una rotación equivalente a 10 minutos de ensayo con una velocidad de 50 rpm.

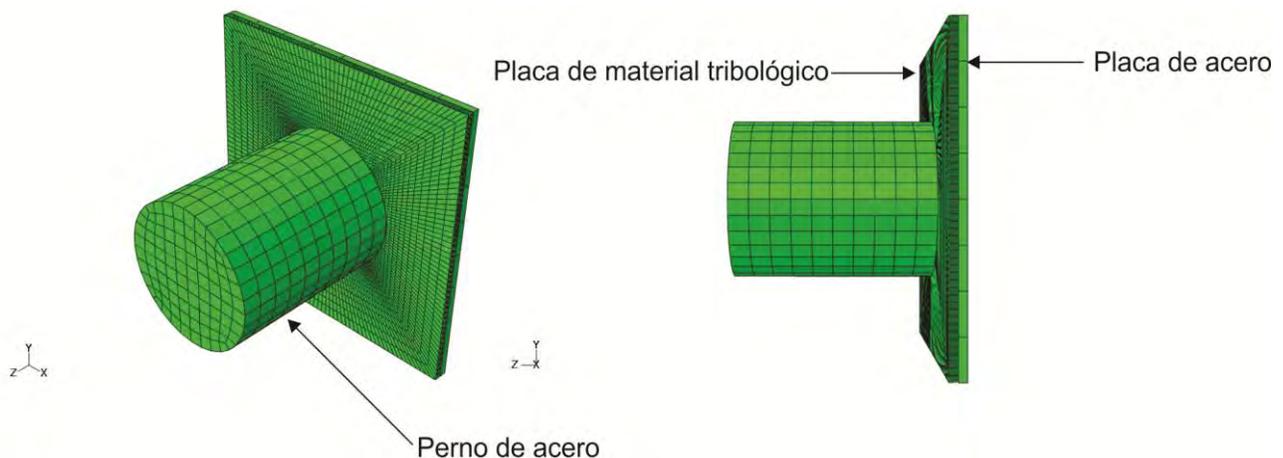


Figura 3.12 Vistas del ensamble utilizado en el modelo.

Con la finalidad de obtener resultados más precisos se realizó un segundo modelo en el cual se redujeron las dimensiones de cada una de las piezas que conforman el modelo, además de que se generaron mallas más densas. El ajuste en el segundo modelo se realizó basado en los resultados arrojados por el primer modelo. Las interacciones, pasos, condiciones de frontera, cargas y desplazamientos se realizaron de igual forma que en el primer modelo.

La modificación que se aplicó al perno consistió en la reducción de su longitud total conservando el radio de curvatura y diámetro. Se generó un mallado que fue aumentando su densidad conforme más cerca del área de contacto se estuviera y que dio como resultado la generación de 12280 elementos (Figura 3.13).

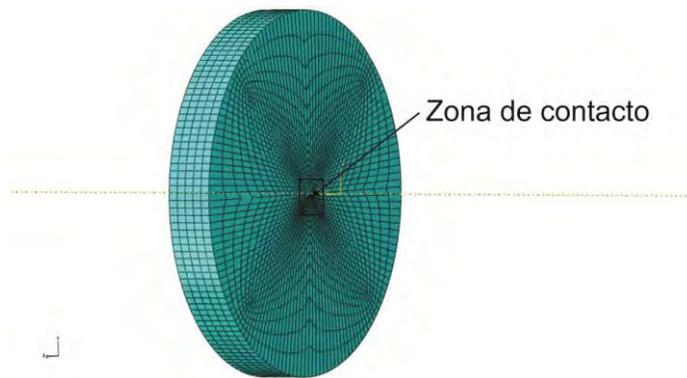


Figura 3.13 Geometría y mallado del perno utilizado en la simulación final.

Tanto la placa de acero como la de aleación funcional se redujeron en dos dimensiones conservando su espesor. En ambas se aumentó la densidad del mallado, especialmente en la de la aleación funcional que se conformó de 64000 elementos, mientras que la placa de acero sólo de 512 elementos (Figuras 3.14 y 3.15)

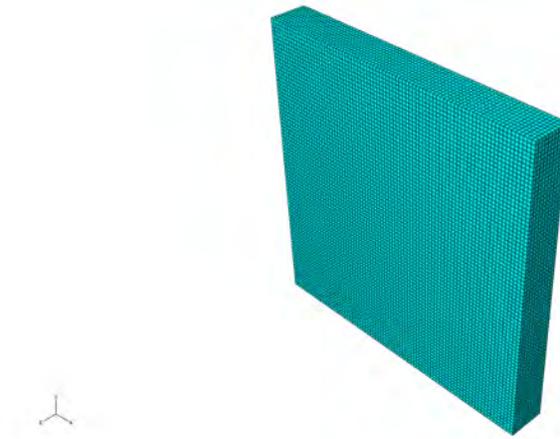


Figura 3.14 Geometría y mallado de la placa de aleación SAE 783

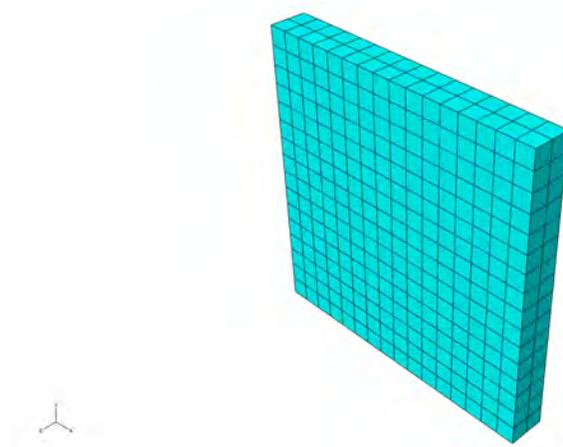


Figura 3.15 Geometría y mallado de la placa de acero.

La geometría y el mallado del ensamble utilizado en este segundo modelo se muestran en la Figura 3.16 y consistió de un total de 76792 elementos.

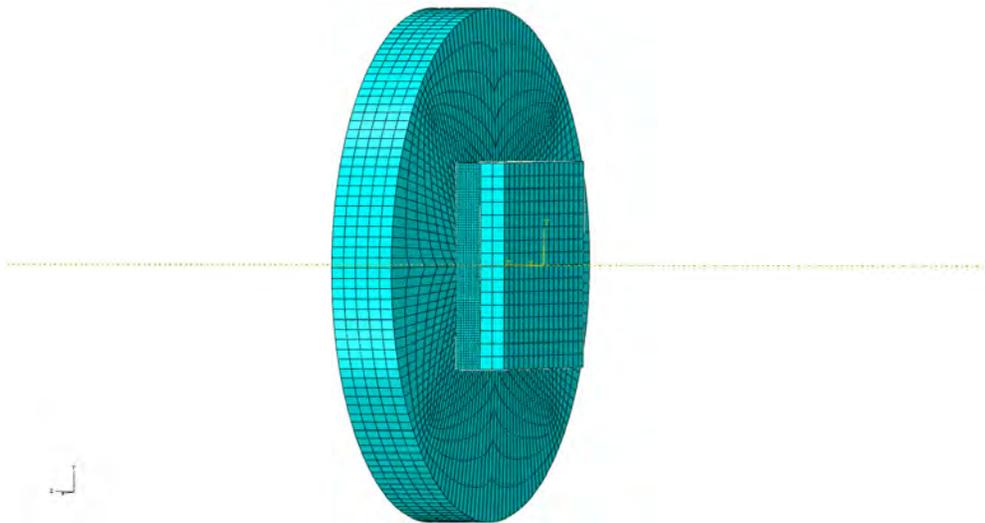


Figura 3.16 Geometría y mallado del modelo ensamblado.

3.3 Ensayo tribológico

La fase propiamente experimental del presente trabajo se dividió en dos etapas: en la primera se implementó una metodología de adquisición de datos con la cual fuese posible obtener los parámetros necesarios para el cálculo de un coeficiente de fricción a partir de un ensayo tribológico. En la segunda etapa se caracterizó la microestructura y propiedades mecánicas del material previamente ensayado.

3.3.1 Tribómetro

Los ensayos tribológicos fueron realizados con un tribómetro coaxial cuyo sistema de aplicación de carga y giro fue previamente diseñado y construido en los talleres de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM), mientras que el diseño del sistema sensor forma parte del presente trabajo.

3.3.1.1 Sistema de aplicación de carga y giro

El tribómetro coaxial utilizado en los ensayos tribológicos permite la aplicación de una carga normal y de un par mediante el giro de un perno acoplado a un sistema de transmisión de potencia.

La carga normal se aplica mediante un tornillo de potencia soportado por dos chumaceras y controlado mediante un volante; dicho tornillo cuenta con rosca derecha e izquierda por lo que es posible el movimiento simultaneo en direcciones opuestas de las barras que desplazan la placa de carga.

El giro del perno se realiza por medio de un sistema motriz y de transmisión de potencia que funciona a través una polea síncrona y un motor de corriente directa capaz de proporcionar 0.5 HP y una velocidad máxima de 1750 rpm [47]. Un esquema simplificado del tribómetro coaxial utilizado se muestra en la Figura 3.17.

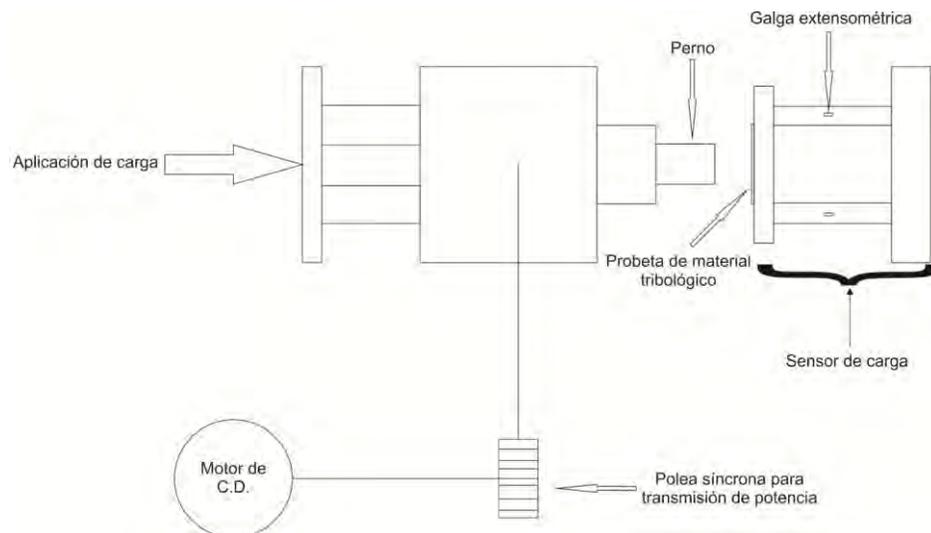


Figura 3.17 Esquema del tribómetro coaxial.

3.3.2 Material utilizado

Para llevar a cabo el proceso de desgaste se utilizaron pernos con un radio de curvatura de 200 mm y un diámetro de 20 mm, los cuales fueron maquinados en acero AISI 9840 mediante equipo de control numérico. En la Figura 3.18 se muestra la geometría de los pernos utilizados.

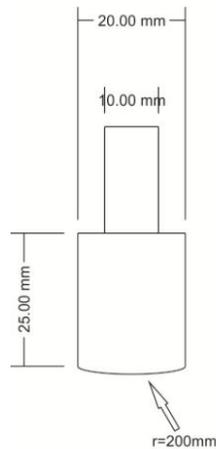


Figura 3.18 Geometría y dimensiones de los pernos utilizados.

La aleación tribológica utilizada fue SAE – 783 cuyo material base fue donado por la empresa MAHLE componentes de motor de México S.de R.L. de C.V. El material donado fue sometido a un proceso termomecánico con la finalidad de obtener las propiedades mecánicas requeridas en cojinetes de deslizamiento utilizados en la industria automotriz. Dicho proceso termomecánico consistió en pasos de laminado en frío hasta lograr deformaciones equivalentes de Von Mises de 3 ($\epsilon_{VM} = 3$) para posteriormente recocer el material a 300°C durante 30 minutos [48].

3.3.3 Preparación de pernos y probetas

Previo a cada uno de los ensayos realizados se prepararon tanto los pernos como las probetas de material tribológico. Los pernos fueron pulidos hasta lograr un acabado espejo cuya rugosidad promedio fue de 0.05 μm , dicha medida de rugosidad se obtuvo mediante la utilización de un rugosímetro. Posterior a cada uno de los ensayos se pulieron nuevamente los pernos ya montados en el tribómetro a un 50% de la velocidad máxima del motor (850 rpm) utilizando lijas 600 y 1200 para finalmente pulir con paño Microcloth®, lo anterior con la finalidad de remover el material que pudiese haber sido transferido durante el ensayo.

Las probetas de material tribológico fueron pulidas con lija de tamaño de malla 300 y 600, posteriormente fueron limpiadas con agua destilada y secadas con aire caliente. Siguiendo el procedimiento anterior se obtuvo en las probetas una rugosidad promedio de $1.26 \mu\text{m}$.

3.3.4 Caracterización mecánica del material tribológico

Con la finalidad de obtener las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en los ensayos tribológicos, se realizaron pruebas de tracción para poder determinar las curvas esfuerzo - deformación y a partir de un análisis estadístico de las mismas establecer el esfuerzo de fluencia que es un parámetro fundamental en el ensayo tribológico [49].

Posterior al proceso termomecánico y utilizando una fresadora de control numérico, se maquinaron probetas de tracción cuya geometría y dimensiones se describen a continuación:

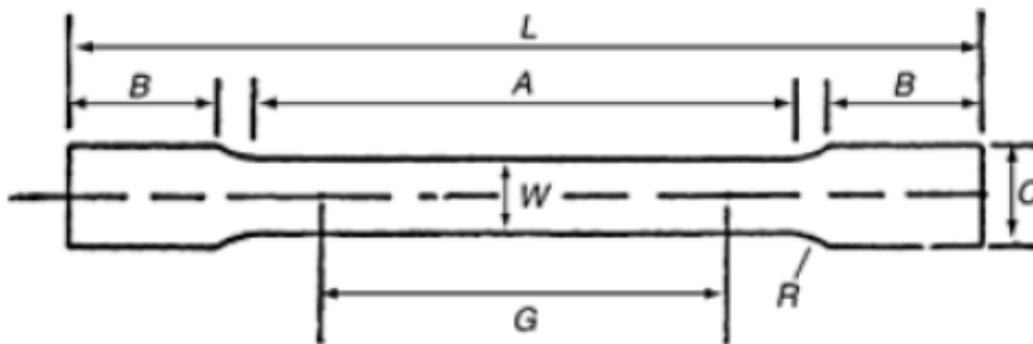


Figura 3.19 Esquema de una probeta de tracción [50].

Tabla 3.1 Descripción de la probeta de tracción.

Denominación	Significado	Dimensiones [mm]
L	Longitud total	100
B	Longitud de la zona de agarre	15 c/u
A	Distancia entre zonas de agarre	32
G	Longitud de la zona de prueba	25
W	Ancho de la zona de prueba	6
C	Ancho de la zona de agarre	10
R	Radio	5

Las probetas fueron ensayadas en una máquina universal para pruebas mecánicas marca Shimadzu AG-X con una celda de carga de 10 kN a una velocidad de 5 mm/min, tal como se establece en la norma ASTM E8M-00 [49]

3.3.5 Realización del ensayo tribológico

A partir de las propiedades mecánicas obtenidas previamente mediante ensayos de tracción fue posible determinar las condiciones de carga a las que el material tribológico sería sometido durante el ensayo. De esta manera fue posible plantear el diseño experimental que se resume en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Descripción de las condiciones de realización del ensayo tribológico.

ω [RPM]	R_{perno} [mm]	P [N]	t [s]	T_{recocido} [°C]	t_{recocido} [s]	ϵ_{VM}
50	200	100	30	300	1800	3
			60			
			240			
			480			
			600			

Para cada uno de los ensayos realizados se registraron y almacenaron datos de deformación a partir de los cuales fue posible obtener y controlar otros parámetros tales como la carga normal aplicada. Lo anterior fue posible gracias a la utilización de equipo comercial de adquisición de datos National Instruments.

El control, muestreo y almacenamiento de datos se realizó mediante el ambiente gráfico de programación LabView 8.6. La frecuencia de muestreo en todos los casos fue de 100 Hz.

3.3.6 Caracterización del material ensayado tribológicamente

La caracterización del material ensayado consistió en lo siguiente:

- Medición de masa.
- Medición de rugosidad.
- Indentación instrumentada.
- Microscopía óptica y electrónica (observación de superficie y secciones metalográficas).

3.3.6.1 Medición de masa

Antes y al finalizar cada uno de los ensayos tribológicos, las probetas fueron pesadas con una balanza cuya precisión alcanza 0.0001 g, esto con la finalidad de establecer si se tuvo transferencia o pérdida de masa.

3.3.6.2 Medición de rugosidad

Se obtuvieron perfiles de rugosidad para cada una de las probetas ensayadas por medio de un rugosímetro marca Mitutoyo modelo SurfTest 402 cuyo funcionamiento consiste en una medición mecánica de la superficie con una guja de punto fino, estableciendo un recorrido total del sensor de 8 mm y procurando que la medición diera inicio fuera de la huella dejada por el perno del tribómetro, atravesara la huella por el centro de la misma y finalizara fuera de la huella, tal como se muestra en el esquema de la Figura 3.20.

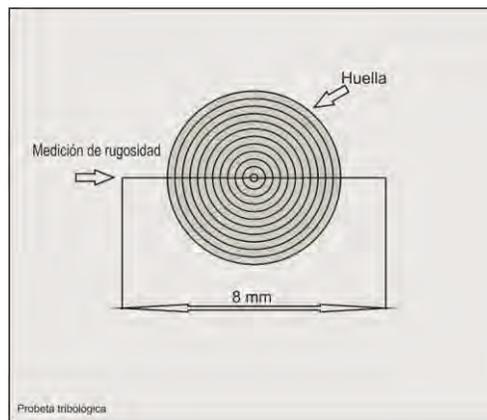


Figura 3.20 Esquema de la obtención del perfil de rugosidad.

Los resultados que el rugosímetro arroja son los siguientes:

- Rugosidad máxima. Corresponde a la distancia máxima que hay entre el pico más alto y el valle más bajo
- Rugosidad promedio (R_a). Se obtiene mediante la ecuación 3.5 y corresponde a la media aritmética de la rugosidad obtenida.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z - \bar{z}| dx \quad (3.5)$$

- RMS (Root mean square). Se obtiene mediante la ecuación 3.6

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L (z - \bar{z})^2 dx} \quad (3.6)$$

En las ecuaciones 3.5 y 3.6 z representa la altura medida por el rugosímetro, \bar{z} la altura promedio de la superficie y L la trayectoria sobre la cual se mide.

3.3.6.3 Indentación instrumentada.

Con la finalidad de caracterizar mecánicamente a la tribocapa generada a partir del ensayo tribológico, se realizaron pruebas de micro-dureza utilizando un micro-durómetro instrumentado Vickers serie Micro/Macro Nanovea de Micro Photonics Inc. Los parámetros que se definieron para el ensayo fueron los siguientes:

- Velocidad de acercamiento: $10 \frac{\mu m}{min}$
- Carga de contacto: $10 mN$
- Carga máxima: $10 N$
- Tasa de carga: $10 \frac{N}{min}$
- Tasa de descarga: $10 \frac{N}{min}$
- Tiempo de retención de la carga: $5 s$
- Tipo de indentador: *Vickers V1016*
- Distancia entre pruebas: $0.5 mm$

Las mediciones se realizaron a lo largo de la probeta comenzando fuera de la tribocapa y pasando por el centro de la misma, procurando realizar por lo menos cuatro indentaciones fuera de la tribocapa; dos a cada costado. En el siguiente esquema se muestra en patrón de microindentaciones (Figura 3.21).

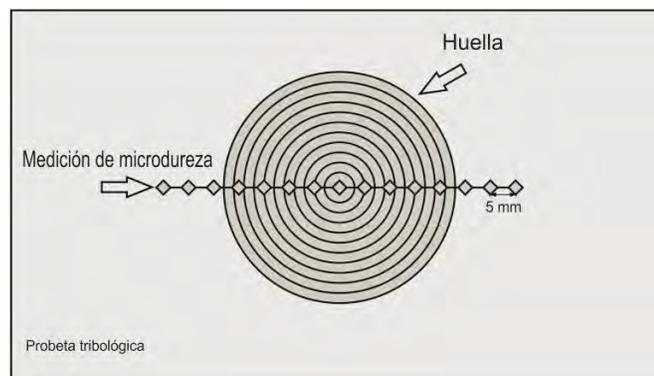


Figura 3.21 Esquema de la obtención de microdureza.

3.3.6.4 Microscopia óptica y electrónica

Para distinguir entre las características metalográficas del material base y la tribocapa formada debido al proceso de deformación plástica severa, se analizaron mediante microscopia óptica y electrónica de barrido cada una de las probetas previamente ensayadas tribológicamente [51].

En primer lugar se observaron las superficies desgastadas y se midieron los diámetros de las huellas generadas durante el ensayo tribológico a una magnificación de 20X con un microscopio óptico equipado con objetivos Olympus de 5X, 20X y 50X y una cámara Olympus U-Camad3 [52].

La medición de diámetros se realizó en dos direcciones a partir de los ejes x_1 y x_2 que se muestran en el siguiente esquema (Figura 3.22).

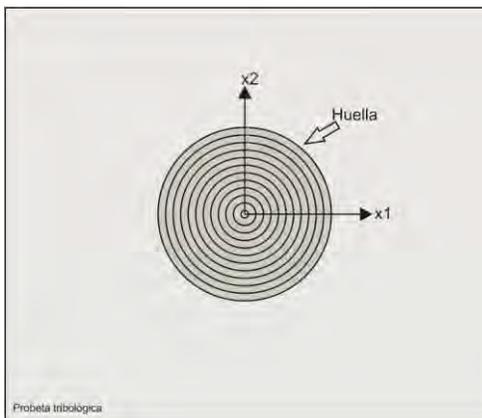


Figura 3.22 Esquema de las direcciones de medición de diámetros.

La misma superficie se observó a 400X y 800X con un microscopio electrónico de barrido marca Phillips modelo XL30 con filamento de tungsteno. Se utilizó un voltaje de aceleración de 15 kV. Posteriormente se prepararon muestras metalográficas cortando en la dirección de laminado las probetas previamente ensayadas, procurando que el corte se realice dentro de la zona en la que se encuentra la tribocapa. Después de realizar el corte, las láminas se montaron en resina de curado en frío y se les hizo metalografía; se comenzó la preparación con lijas cuyo tamaño de malla fue 240, 360, 500, 600 y 1200, para finalmente pulir con alúmina de tamaño $0.05 \mu\text{m}$. La observación de estas probetas se realizó con un microscopio electrónico de barrido cuyas características han sido previamente especificadas [53]. En la Figura 3.23 se muestra un esquema de las probetas utilizadas.

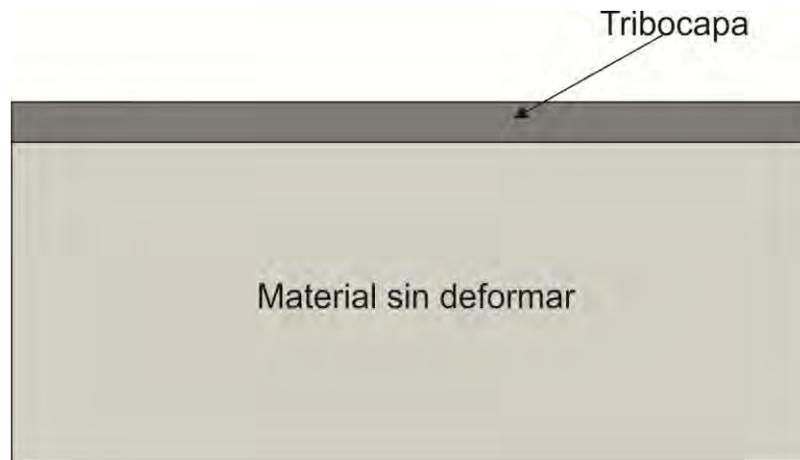


Figura 3.23 Esquema de sección en lámina.

Capítulo 4. Resultados

En el presente capítulo se muestran y resumen los resultados obtenidos a partir de la caracterización del material tribológico la cual, como se explicó en el capítulo 3, consistió en:

- Medición de la masa en probetas antes y después del ensayo tribológico.
- Medición del perfil de rugosidad.
- Indentación instrumentada.
- Obtención de micrografías mediante microscopía óptica y electrónica de barrido de la superficie desgastada.
- Obtención de secciones y metalografía de las mismas.
- Obtención de micrografías mediante microscopía óptica y electrónica de las secciones previamente obtenidas.

Cabe destacar que en la medición de masas y obtención de micrografías se consideró la totalidad de los datos obtenidos, mientras que en la medición de rugosidad, medición de diámetros e indentación instrumentada sólo se trabajó con las probetas más representativas de cada grupo.

4.1 Evaluación del proceso tribológico

A continuación se muestra una tabla con los valores de las masas para cada una de las probetas antes y después del ensayo tribológico.

Tabla 4.1 valores de masas para cada probeta antes y después del ensayo.

No. de probeta	Masa inicial [g]	Masa final [g]
1	2.6331	2.633
2	2.6982	2.698
3	2.7018	2.702
4	2.4221	2.6221
5	2.5832	2.5831
6	2.6412	2.6409
7	2.631	2.6308
8	2.6281	2.6282
9	2.6871	2.6871
10	2.5977	2.5975

11	2.7051	2.7051
12	2.6552	2.6549
13	2.6022	2.6021
14	2.6991	2.6992
15	2.6494	2.6496
16	2.4919	2.4918
17	2.6874	2.6873

Como se puede observar en los datos mostrados en la tabla anterior, los valores obtenidos para la masa de cada una de las probetas no sufren cambios considerables después de haberse realizado el ensayo tribológico, la variación entre los valores antes y después del ensayo es mínimo y se encuentra en el límite de la resolución del instrumento de medición utilizado, por ello es que dichas variaciones se pueden atribuir a factores que no involucran transferencia, pérdida o incremento de masa durante el ensayo.

El hecho de no tener pérdida o ganancia de masa en las probetas confirma que el material tribológico utilizado en los ensayos cumple con una de las características más importantes que se buscan en las aleaciones funcionales para cojinetes de deslizamiento: la compatibilidad con el material con que está fabricado el eje o flecha [54].

4.2 Rugosidad

Antes de cada uno de los ensayos se obtuvo el perfil de rugosidad para cada probeta ensayada en el tribómetro coaxial. Como era de esperarse y debido a la preparación que se le dio a las probetas; la rugosidad promedio se encuentra dentro de un intervalo estrecho de valores. Lo anterior se puede constatar observando la Figura 4.1, donde se muestran los valores promedio de la rugosidad antes del ensayo tribológico.

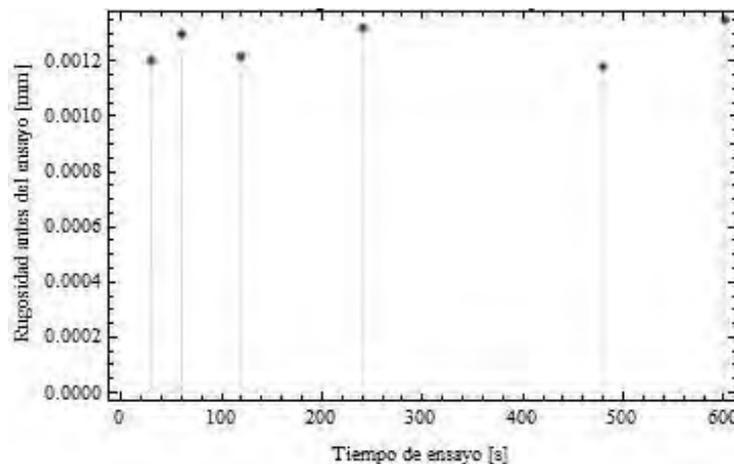


Figura 4.1 Valores de rugosidad antes del ensayo.

A partir de los perfiles obtenidos es posible observar que tanto el valor de la rugosidad promedio como de la rugosidad máxima aumenta proporcionalmente con respecto al tiempo que duró cada ensayo; este comportamiento se hace más evidente conforme la diferencia entre los tiempos de ensayo se hace mayor. En la Figura 4.2 se muestra el cambio de la rugosidad promedio comparada con la rugosidad inicial, la cual fue de $1.126 \mu\text{m}$.

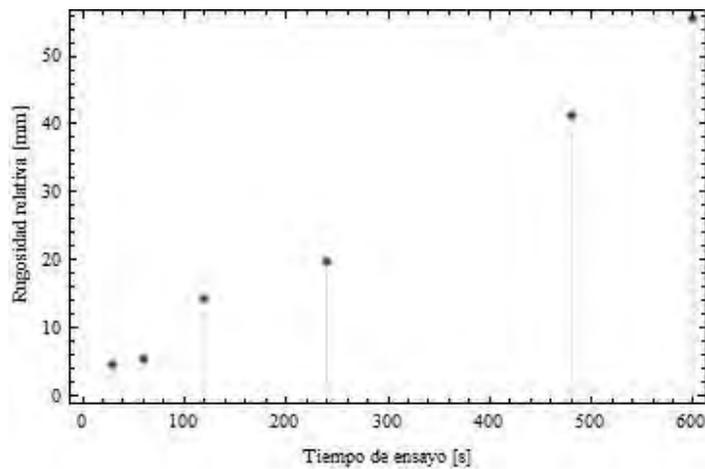


Figura 4.2 Valores de rugosidad relativa promedio después del ensayo.

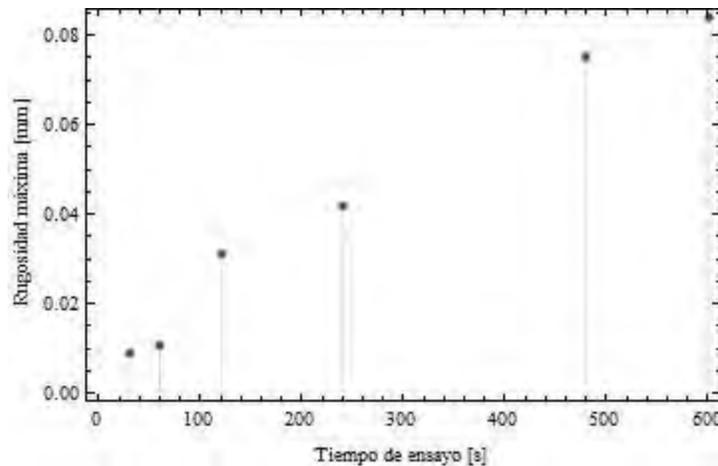


Figura 4.3 Valores de rugosidad máxima después del ensayo.

En las Figuras 4.2 y 4.3 es posible observar que los valores de rugosidad relativa promedio y rugosidad máxima en las huellas dejadas por el ensayo tribológico presentan el mismo patrón, es decir, a mayores tiempos de ensayo se tiene un mayor valor de rugosidad.

Gracias a la conservación de la masa mostrada al inicio del presente capítulo y a lo observado en los perfiles de rugosidad, es posible establecer que durante el ensayo tribológico el material fluye de manera radial, desplazando un determinado volumen y debido a ello se forma un perfil como los mostrados a continuación.

Tabla 4.2 Diámetros de huellas tribológicas

Duración del ensayo [s]	Diámetros medidos en x1	Diámetros medidos en x2
30	2.104	2.202
60	2.252	2.231
120	2.453	2.609
240	2.708	2.669
480	3.312	3.302
600	4.004	4.036

Los resultados anteriores coinciden con lo obtenido por medio del método de elementos finitos donde, como se mostrará a continuación, fue posible estimar el diámetro de la huella dejada por el perno. El modelado se realizó sin tomar en cuenta el fenómeno de termofluencia que sin duda se presenta en el material y es por ello que solamente se ha obtenido un valor para la deformación ya que al no tomar en cuenta la variable temporal el modelo arroja los mismos resultados para un ensayo de 30 segundos que para uno de 600 segundos.

En la Figura 4.10 se muestran los resultados del primer modelo en el cual, como se mencionó en el Capítulo 3, se consideraron las dimensiones reales del experimento.

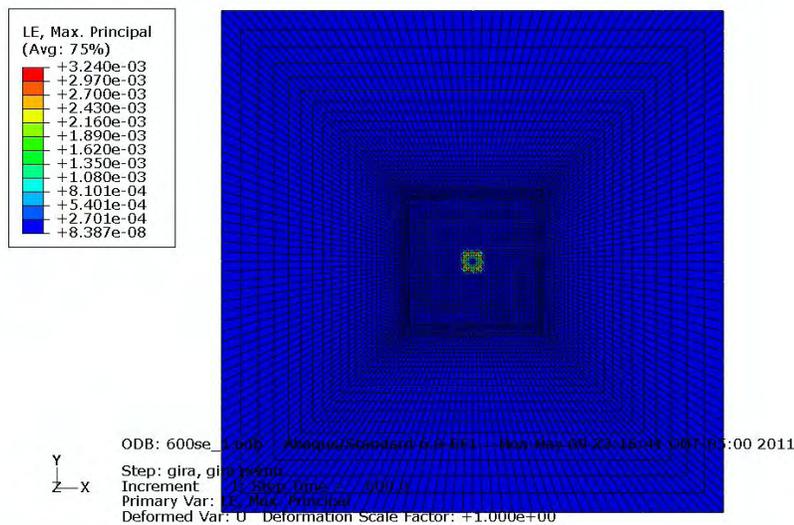


Figura 4.10 Esquema de la deformación obtenida en la simulación realizada con el primer modelo.

Un inconveniente que se presentó en este modelo fue que la geometría de la deformación generada por el perno no coincide con lo esperado ya que como se muestra en la Figura 4.11 ésta presenta una forma cuadrada.

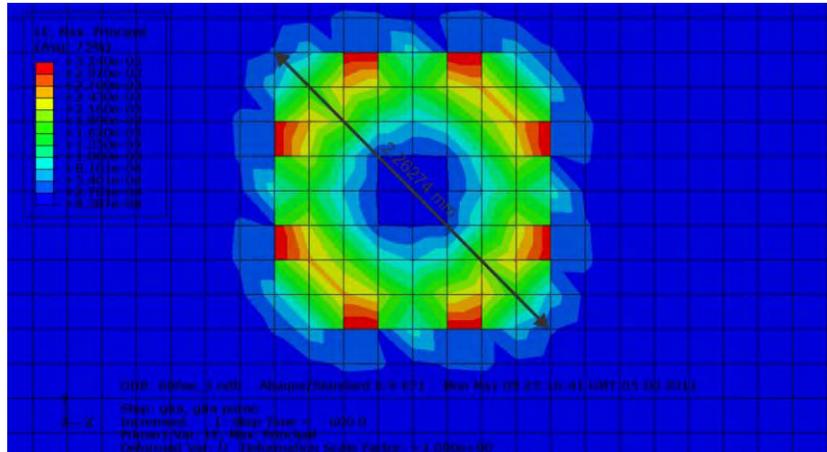


Figura 4.11 Acercamiento de la zona deformada en la simulación realizada con el primer modelo.

A continuación se muestran las dimensiones de la huella obtenida por medio de la simulación en el primer modelo:

Tabla 4.3 Componentes del diámetro obtenido en la simulación.

Dirección	X_1	X_2	X_3	Magnitud
Valor [mm]	1.6	1.6	0	2.26274

El inconveniente mencionado anteriormente sin duda fue producto de un mallado burdo en la zona de máxima deformación, tanto del perno como de la placa de material tribológico. Sin embargo, este modelo sirvió como guía para la realización de un nuevo modelo donde sólo se consideraron las zonas donde se tendría contacto, de esta manera fue posible generar un modelo cuyo mallado fuese óptimo en términos geométricos y de recursos computacionales.

El segundo modelo arrojó resultados similares al primero en términos de magnitud, éstos se muestran a continuación.

En la Figura 4.12 se aprecia la placa de aleación SAE 783 deformada, la geometría de la huella coincide perfectamente con lo esperado y observado en el ensayo tribológico, donde la huella adopta una forma circular.

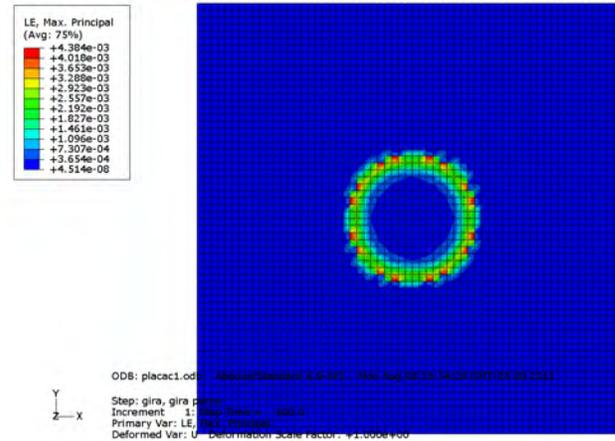


Figura 4.12 Placa deformada (segundo modelo).

Como ya se mencionó, en el caso del primer modelo; x_1 y x_2 corresponden a componentes del vector que atraviesa la huella tribológica, la cual no es precisamente circular debido a la poca fineza y geometría de la malla. Esto a diferencia de las huellas obtenidas experimentalmente donde x_1 y x_2 corresponden a la dirección en la que se ha medido el diámetro. Basado en lo anterior es posible afirmar que los diámetros obtenidos tanto experimentalmente con un tiempo de ensayo de 30 segundos y los obtenidos por medio de ambos modelos son muy similares.

Tabla 4.4 Comparación de resultados obtenidos experimentalmente y mediante simulación.

Diámetro medido [mm]	Diámetro obtenido del primer modelo [mm]	Diámetro obtenido del segundo modelo [mm]
2.202	2.26274	2.20184

Tal como se esperaba; el perno no sufrió deformaciones considerables con respecto a las que se presentaron en el material tribológico. Esto se puede apreciar gráficamente en las Figuras 4.13 y 4.14, donde se muestra el perfil de ambos elementos.

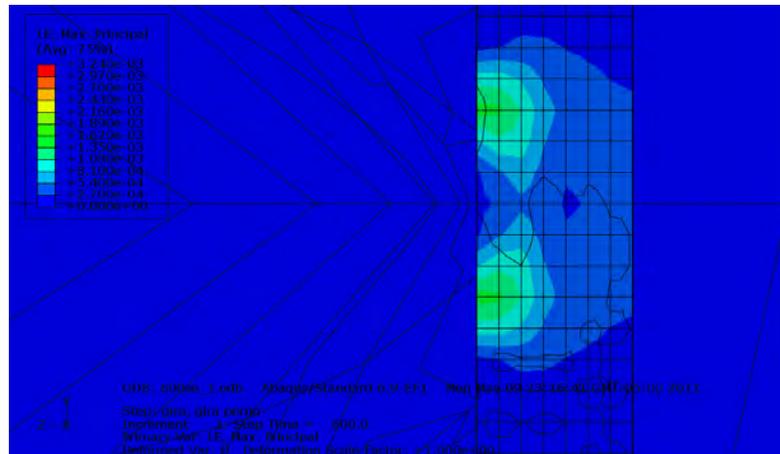


Figura 4.13 Perfil de la primera simulación mostrando deformación en el perno y en el material tribológico.

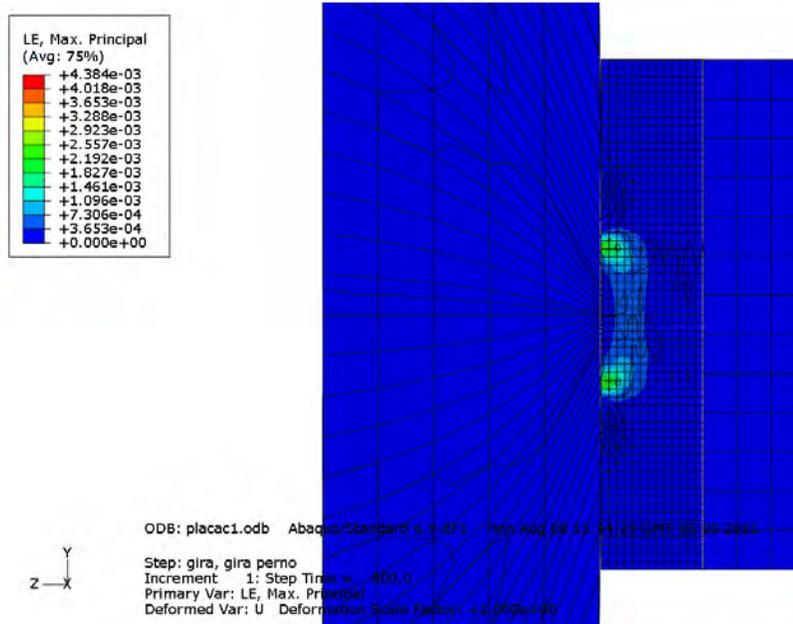


Figura 4.14 Perfil de la segunda simulación mostrando deformación en el perno y en el material tribológico.

Aunque el perno no presentó deformación alguna, es obvio que respondió a la carga aplicada mediante un esfuerzo que llegó a los 2.3 MPa, tal como se muestra en las Figuras 4.15 y 4.16.

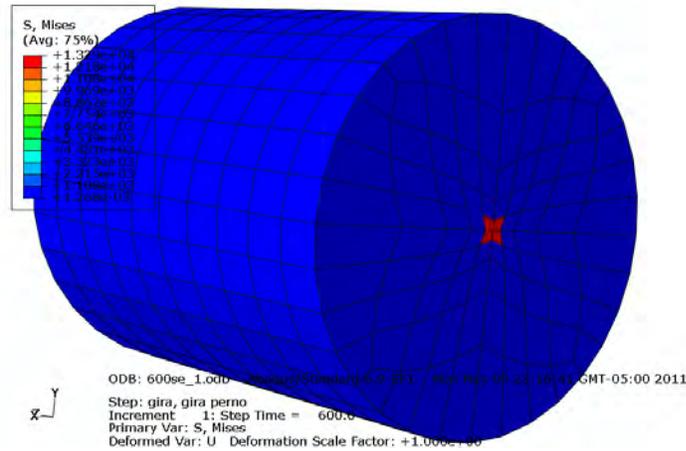


Figura 4.15 Esquema que muestra el estado de esfuerzos de Von Mises en el perno en el primer modelo.

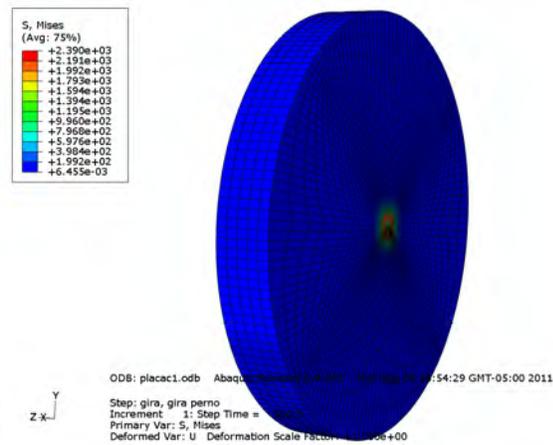


Figura 4.16 Esquema que muestra el estado de esfuerzos de Von Mises en el perno en el segundo modelo.

4.4 Indentación instrumentada

Aunque en la Figura 4.17 no se observa un patrón a partir del cual se pueda relacionar el tiempo de ensayo con la dureza obtenida mediante microindentación instrumentada, es evidente que la dureza en la zona deformada con el perno del tribómetro es mayor que en la zona sin deformar. Los datos mostrados corresponden al promedio del valor de la dureza medida fuera y dentro de la huella.

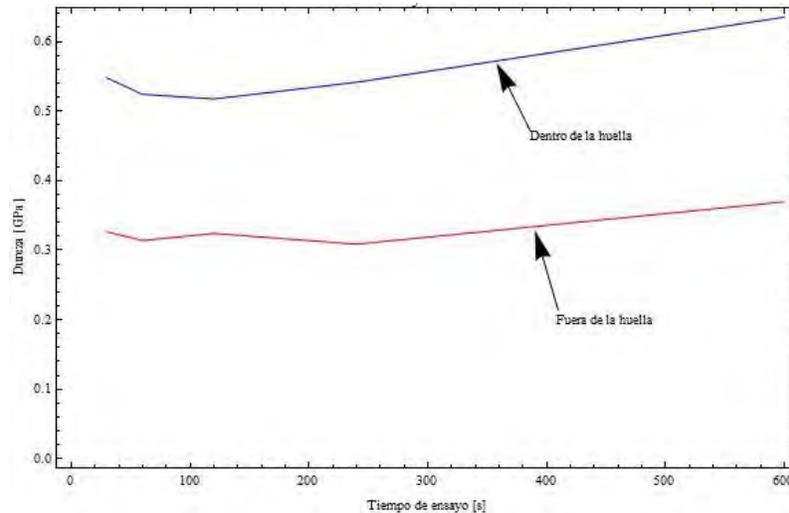


Figura 4.17 Valores de dureza dentro y fuera de las huellas como función del tiempo de ensayo.

En el caso de la dureza medida fuera de la huella es posible apreciar homogeneidad en los valores obtenidos, esto es algo obvio ya que las probetas fueron obtenidas de un mismo lingote y se sometieron al mismo proceso termomecánico. Dentro de la huella se puede observar que al aumentar el tiempo del ensayo la dureza tiende a incrementarse aunque no de manera dramática. Cabe destacar que para la obtención de los promedios mostrados en la gráfica anterior se tomaron en cuenta por lo menos cuatro valores de microdureza tanto dentro como fuera de la huella.

4.5 Comportamiento del material durante el ensayo tribológico

En este punto es importante hacer mención de un resultado cualitativo derivado del ensayo tribológico que se llevó a cabo con la finalidad de establecer parámetros que permitieran la evaluación del proceso de formación de tribocapas dependiendo del tiempo de ensayo en el tribómetro, del proceso termomecánico al que la aleación funcional fue sometida o del material utilizado. Cabe destacar que las condiciones de ensayo para cada uno de los materiales ensayados fueron las mismas. Es decir, se aplicó una carga de 100N normal a la superficie a ensayar mediante un perno de 200 mm de radio de curvatura y posteriormente se aplicó un giro cuya velocidad angular fue de 50 rpm.

La aleación SAE 783 que previamente había sido sometida a un proceso termomecánico que consistió en llegar mediante pasos de laminado a una deformación equivalente de Von Mises de 3 [55], para posteriormente ser recocida durante 30 minutos a 300°C mostró un comportamiento tribológico adecuado, el material desarrolló un periodo transitorio para posteriormente estabilizarse y poder terminar satisfactoriamente el ensayo durante el tiempo requerido a una carga normal constante. Es importante señalar que un comportamiento similar se presentó al ensayar la aleación CuPb, la cual es ampliamente utilizada en cojinetes trimetálicos [56].

Un comportamiento muy diferente al descrito en el párrafo anterior se presentó en el material al que solamente se le aplicaron pasos de laminado sin ser recocido. El ensayo no alcanzó a llevarse a cabo por completo ya que el equipo comenzó a mostrar inestabilidad provocada por un exceso de vibraciones. Posterior a este comportamiento el motor del tribómetro no tuvo la potencia necesaria para llegar al par requerido y continuar con el giro del perno, lo que obligó a detener el ensayo.

4.6 Microestructuras

Parte fundamental del presente capítulo es mostrar que gracias a la obtención de microestructuras y superficies obtenidas mediante microscopía electrónica ha sido posible caracterizar y explicar el tipo de daño que se presenta en los materiales funcionales de cojinetes de deslizamiento. Mediante la observación de los perfiles y superficies desgastadas en el material previamente sometido a proceso termomecánico y ensayo tribológico se podrá realizar una comparación que permita la caracterización de la zona en la que se presenta una mezcla mecánica y la zona de deformación plástica [57]. La observación de las superficies desgastadas mediante microscopía electrónica de barrido se realizó con la finalidad de analizar el daño provocado al material tanto con el perno del tribómetro coaxial, así como con el indentador del microdureómetro [42, 58, 59].

4.6.1 Superficies

De las Figuras 4.18 a 4.35 se muestran zonas en las que es posible observar el daño realizado por el perno sobre la superficie de material tribológico, así como diversas zonas deformadas durante el ensayo de microdureza.

En las siguientes micrografías se muestra la zona deformada plásticamente por el perno de acero montado en el tribómetro coaxial. El material tribológico es la aleación SAE 783 previamente sometida a un proceso termomecánico que garantiza la obtención de propiedades mecánicas óptimas en cojinetes de deslizamiento de uso automotriz [48, 54, 60].

En la Figura 4.18 se muestra la zona de mezcla mecánica que compone la tribocapa característica este tipo de aleaciones dúctiles [58]. Es posible observar que las líneas de laminado (las cuales se pueden reconocer a partir de los listones de estaño que se aprecian fuera de la tribocapa) se han incorporado a la zona de mezcla mecánica. Sin embargo, en el caso de la Figura 4.18 que corresponde a un ensayo tribológico de 60 segundos, aún es posible ver dichas líneas. A simple vista no se observa daño severo en la superficie, además de una ligera excentricidad en la geometría de la huella.

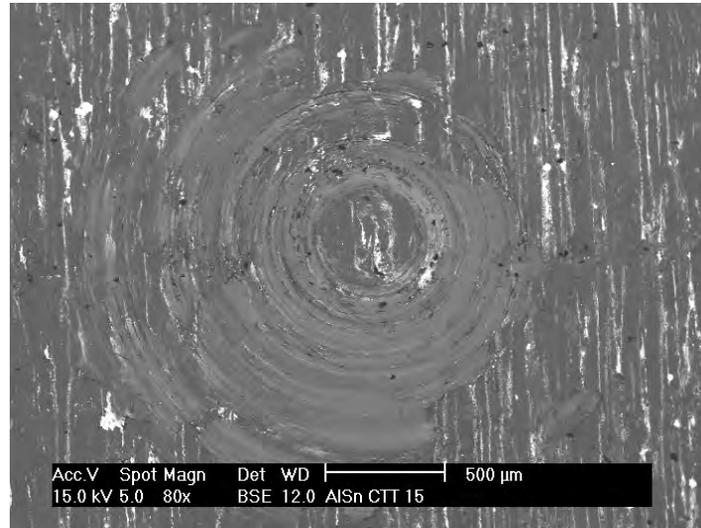


Figura 4.18 Superficie de material con tratamiento térmico ensayado tribológicamente durante 60 segundos.

A mayores aumentos es posible ver un ligero patrón de flujo de estaño al centro de la huella, causado durante el ensayo tribológico; también se observan pequeñas zonas agrietadas dentro de la tribocapa.

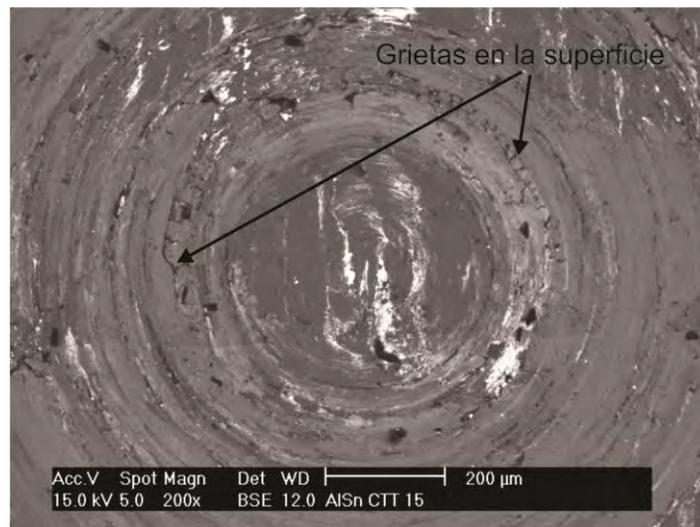


Figura 4.19 Superficie de material con tratamiento térmico ensayado tribológicamente durante 10 minutos.

En el caso de una probeta ensayada durante 60 segundos se puede ver que la mezcla mecánica adopta un patrón homogéneo en zonas cercanas al centro de la huella y comienza a desaparecer conforme se llega al final de la misma, apreciándose zonas alargadas de aluminio con pequeños depósitos de estaño que siguen el patrón de flujo impuesto por el ensayo tribológico.

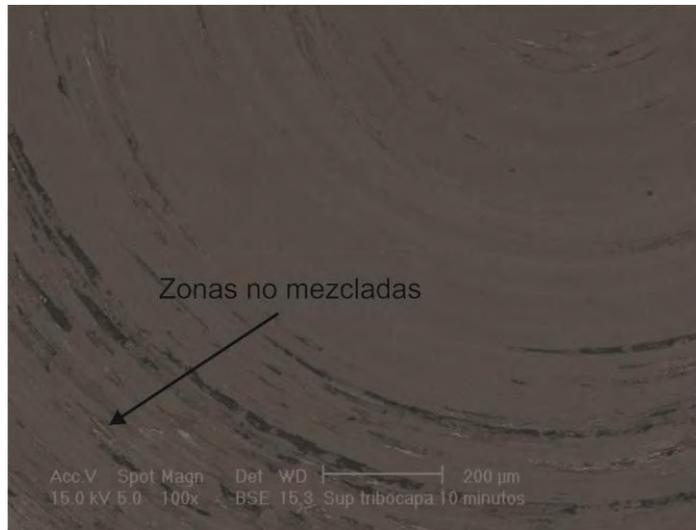


Figura 4.20 Superficie de tribocapa generada a partir de 10 minutos de ensayo tribológico.

Dentro de la zona de mezcla mecánica que define la tribocapa, se pueden observar pequeñas regiones donde el estaño no se ha mezclado con el aluminio. Sin embargo, dicho estaño ya no se encuentra en la dirección del laminado, sino que ha adoptado la dirección en la que el perno deformó el material tribológico.

Al analizar las Figuras a mayor detalle es posible observar que el material al que se le ha aplicado un recocido posterior al laminado presenta un grado de ductilidad tal que le permite deformarse sin llegar a la fractura durante el ensayo tribológico.

Un claro ejemplo de lo mencionado en el párrafo anterior es lo mostrado en las Figuras 4.21, 4.22, y 4.23 donde es posible apreciar zonas de mezcla mecánica con residuos de estaño que no han llegado a mezclarse y donde el material no presenta un daño superficial considerable a pesar del alto grado de deformación plástica al que se ha sometido durante el ensayo tribológico.

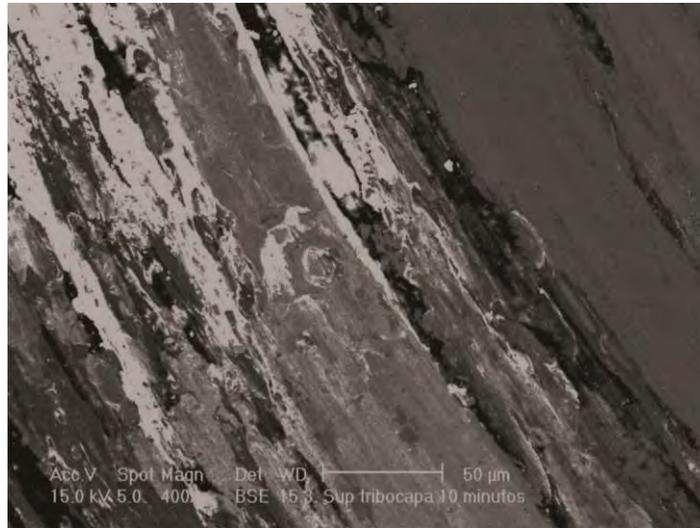


Figura 4.21 Superficie en tribocapa generada a partir de 10 minutos de ensayo tribológico.

Las Figuras 4.22 y 4.23 corresponden a la misma zona de la Figura 4.21, se aprecian claramente zonas donde ni el aluminio ni el estaño han formado parte de la mezcla mecánica. Sin embargo, esto sólo ocurre en zonas específicas, teniéndose en la zona de ensayo tribológico una gran cantidad de material mezclado.



Figura 4.22 Surcos formados por el desgaste aplicado mediante el perno (10 minutos de ensayo).

También es posible observar que aún en zonas donde la mayor cantidad de material no corresponde al característico de la tribocapa, se tienen pequeñas cantidades de material mezclado

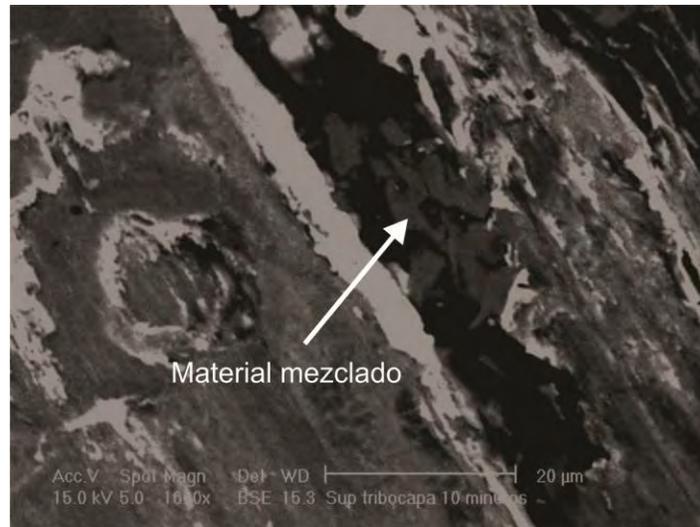


Figura 4.23 Material mezclado en una zona rica en Sn (10 minutos de ensayo).

En el caso de las probetas que han sido sometidas a recocido es posible apreciar que en la zona límite entre la tribocapa y el material no deformado se tienen daños superficiales producto de la indentación que provoca el perno, así como de la excesiva deformación plástica que en esa zona se ha generado. Estos fenómenos han provocado que el material mezclado se desplace y se tengan diferencias en los perfiles de rugosidad, lo cual ha sido expuesto previamente en el presente capítulo.

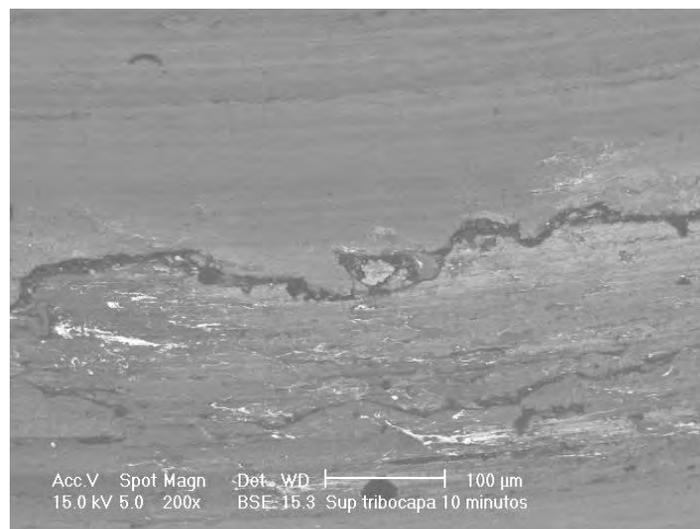


Figura 4.24 Zona agrietada de material con tratamiento térmico. En la parte superior se tiene material mezclado, mientras que en la parte inferior se observa el material base ligeramente modificado (10 minutos de ensayo).

En la misma zona se presentan depósitos de material mezclado que no corresponde a la tribocapa, además de listones de estaño que no llegaron a incorporarse a la mezcla

mecánica y que formaban parte de las líneas de laminado que se tienen en el material previo al ensayo tribológico.

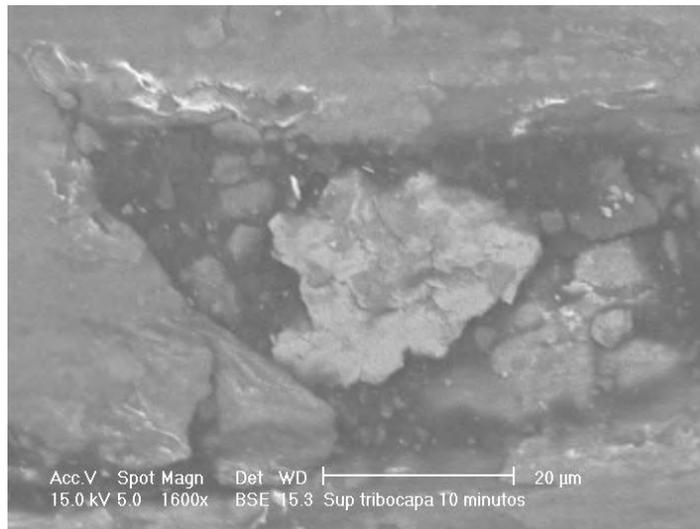


Figura 4.25 Material no mezclado (10 minutos de ensayo).

En las zonas más externas de la huella tribológica se aprecian daños ligeramente más severos, llegándose a tener “surcos” producto del desplazamiento del material, estos se reconocen por estar en una zona intermedia entre la tribocapa homogénea y la zona no deformada. En la Figura 4.26 se observa parte del material no deformado, el cual se caracteriza por las líneas producto del laminado, también es posible apreciar un surco externo a la huella.

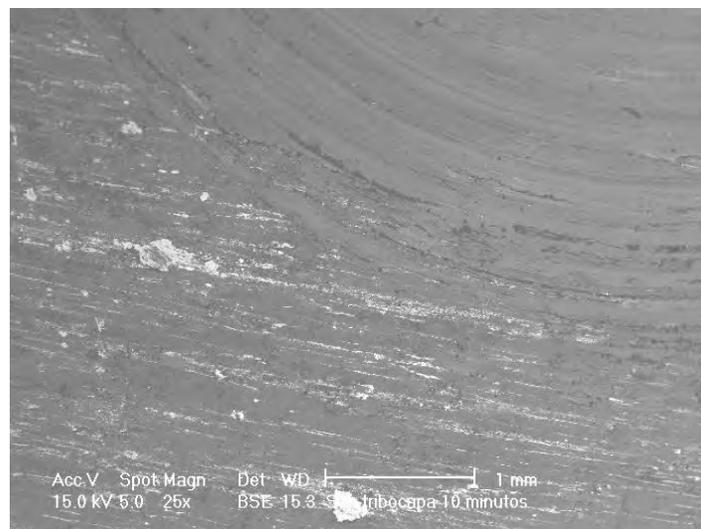


Figura 4.26 Frontera entre material base y material mezclado (10 minutos de ensayo).

Como se ha mostrado en las Figuras 4.25 y 4.26, el material recocido y deformado plásticamente no presenta agrietamiento visible en el centro de la tribocapa, situación diferente a la que se tiene en la zona exterior de la misma, donde a grandes aumentos es posible ver que el material mezclado ha sufrido agrietamiento, lo cual se muestra en la Figura 4.27.

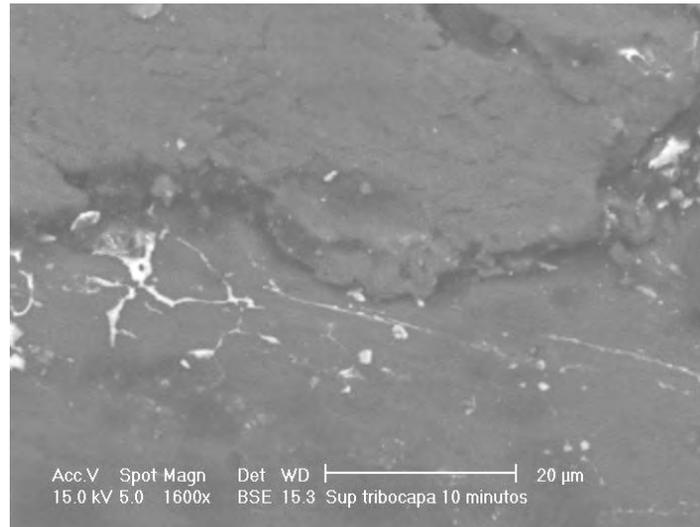


Figura 4.27 Agrietamiento en tribocapa (10 minutos de ensayo).

En algunas zonas cercanas al centro de la huella se presentó desprendimiento de material, esto provocó que el material mezclado presentara agrietamiento derivado de la excesiva deformación plástica que se tuvo durante el ensayo tribológico. Dicho agrietamiento se presentó principalmente en dirección perpendicular al giro del perno, siendo esto signo característico de desgaste adhesivo [61].



Figura 4.28 Zona de desgaste adhesivo (10 minutos de ensayo).

Otro fenómeno derivado del desprendimiento de material, fue que se presentara un agrietamiento considerable en el material base sobre el cual se encuentra la tribocapa. Es importante señalar que a diferencia de las Figuras 4.27 y 4.28, el agrietamiento mostrado en la Figura 4.29 no se presentó en la tribocapa, sino en la base SAE 783.

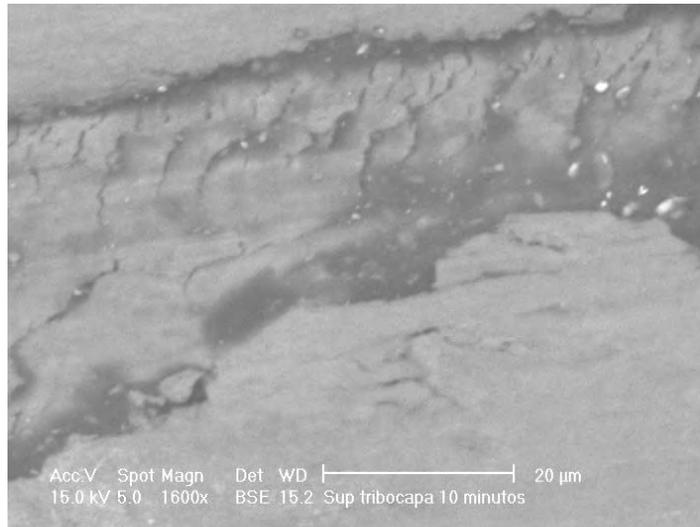


Figura 4.29 Agrietamiento característico de desgaste adhesivo en probeta ensayada durante 10 minutos.

Como ya se ha mostrado, la tribocapa lograda a partir del ensayo tribológico presenta sólo en casos excepcionales agrietamiento producto de la deformación plástica inducida por el perno durante el ensayo. Sin embargo, el material al haber sido deformado plásticamente aumenta su densidad de dislocaciones lo que se traduce en un aumento en su resistencia mecánica [33, 36]. Lo anterior se puede constatar con la Figura 4.30, la cual corresponde a una huella de indentación Vickers.

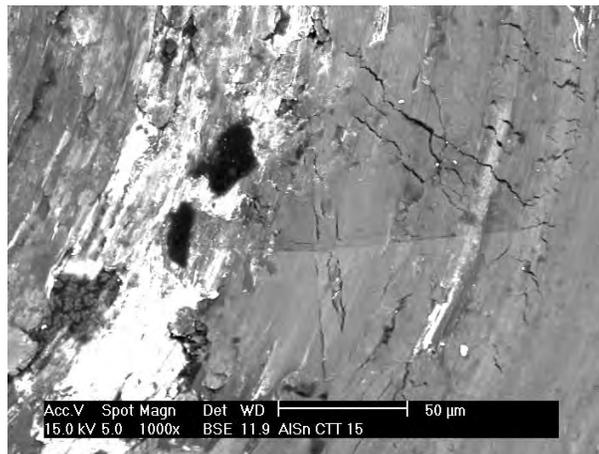


Figura 4.30 Agrietamiento por indentación, es posible observar agrietamiento en la zona cercana a la huella de indentación.

En la Figura 4.30 se puede apreciar un severo agrietamiento producto de la indentación con el microdurómetro, este agrietamiento coincide con el perímetro del microindentador, lo que lleva a establecer que debido a la deformación plástica generada a partir del ensayo tribológico el material ha perdido ductilidad y por ello se ha fracturado el aplicar deformaciones excesivas.

El comportamiento mostrado en las Figuras que comprenden de la 4.18 a la 4.30 corresponde a material recocido, el cual como ya se ha mencionado en el presente capítulo presentó un comportamiento óptimo durante el ensayo tribológico. En contraste; el material de aleación SAE 783 sin tratamiento térmico tuvo un pobre desempeño en lo que a comportamiento tribológico se refiere. A continuación en las Figuras 4.31, 4.32 y 4.33 se intentará dar una explicación a dicho comportamiento.

El daño superficial que se presenta en el material sin recocer es evidente a simple vista. En la Figura 4.31 se puede apreciar el severo daño provocado por el giro del perno que desplazó el material dejando “surcos” bastante gruesos en la dirección de giro del perno provocando que la mayor parte del material removido se asentara en una zona específica de la huella.

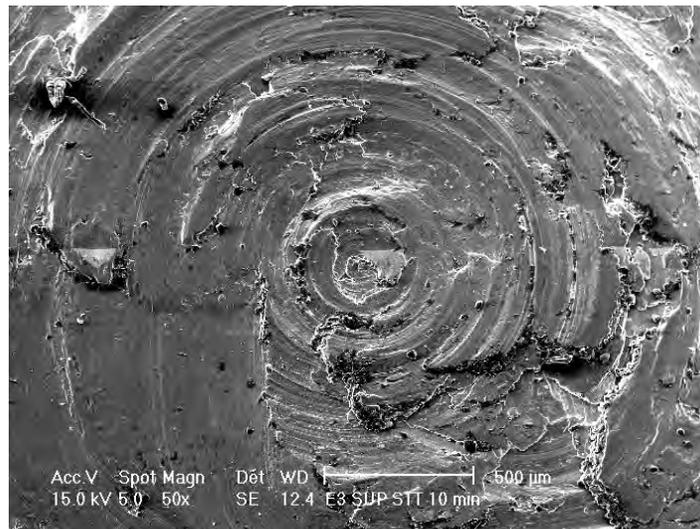


Figura 4.31 Zona deformada por el perno en material sin tratamiento térmico, se observa desplazamiento del material a una zona específica (3 minutos de ensayo).

Además del desplazamiento del material se puede observar un agrietamiento bastante severo producto de la resistencia a la deformación que se tiene en el material y que fue inducida por medio de la deformación plástica a través del laminado en frío.

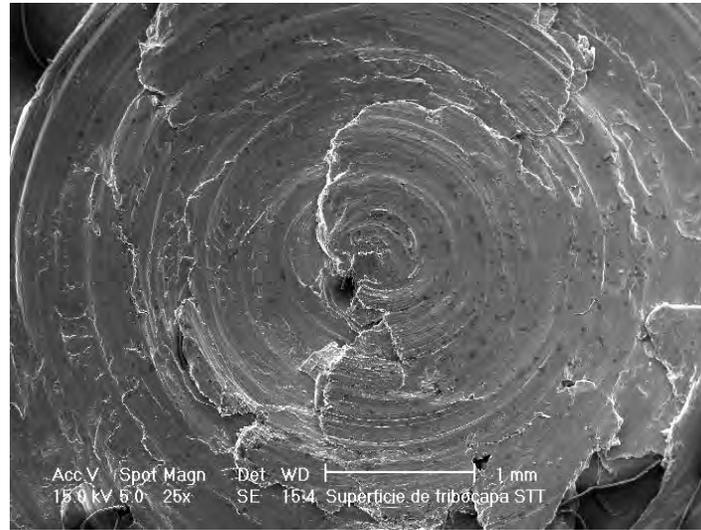


Figura 4.32 Zona deformada por el perno en material sin tratamiento térmico (3 minutos de ensayo).

Al centro de la huella se puede apreciar un daño severo el cual se derivó de la presión ejercida con el perno, combinado con el giro del mismo, dando como resultado un afecto de “arado” el cual provocó que partículas que en un inicio se encontraban en el centro del material se desplazaran a sus alrededores [18].

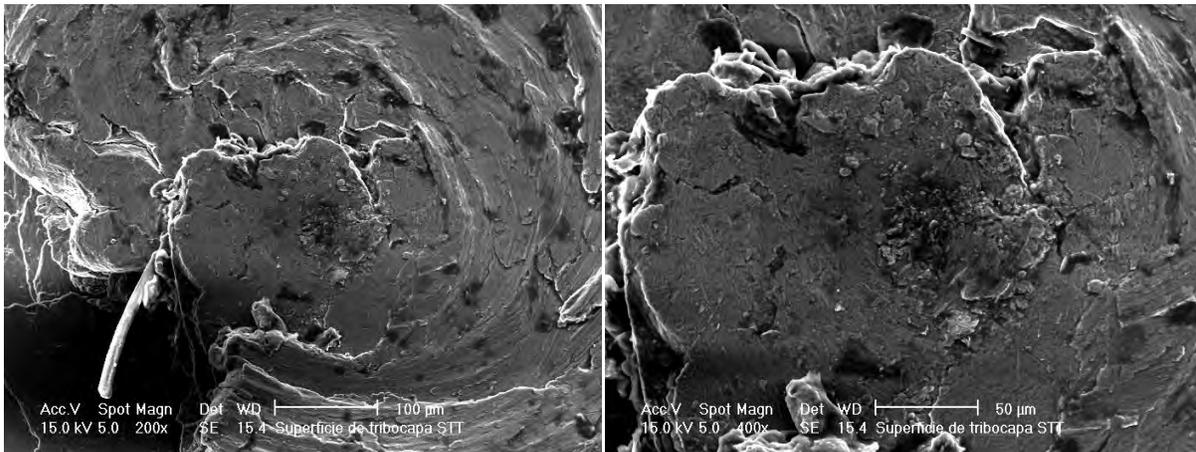


Figura 4.33a hojuela en superficie sin tratamiento térmico (3 minutos de ensayo).

Figura 4.33b hojuela en superficie sin tratamiento térmico (3 minutos de ensayo).

En las Figuras 4.33a y 4.33b es posible observar el centro de la huella rodeado de un severo agrietamiento.

Actualmente las aleaciones CuPb son muy utilizadas en cojinetes de deslizamiento para motores de combustión interna de uso automotriz, su comportamiento tribológico es adecuado para esta aplicación, además de que sus propiedades mecánicas cumplen cabalmente con los requerimientos de este tipo de material.

En las Figuras 4.34 y 4.35 se muestra el comportamiento superficial de una aleación CuPb con respaldo de acero sometida a un ensayo tribológico cuya duración fue de 10 minutos. Es importante destacar el poco daño que el material tribológico sufrió durante el ensayo, lo cual se ve reflejado en el pequeño diámetro de la huella dejada por el mismo.

La Figura 4.34 muestra la totalidad de la zona desgastada en la cual los “surcos” en la aleación funcional apenas pueden apreciarse. Es posible ver zonas donde se ha desprendido material cuya morfología corresponde al plomo presente en este tipo de aleaciones.

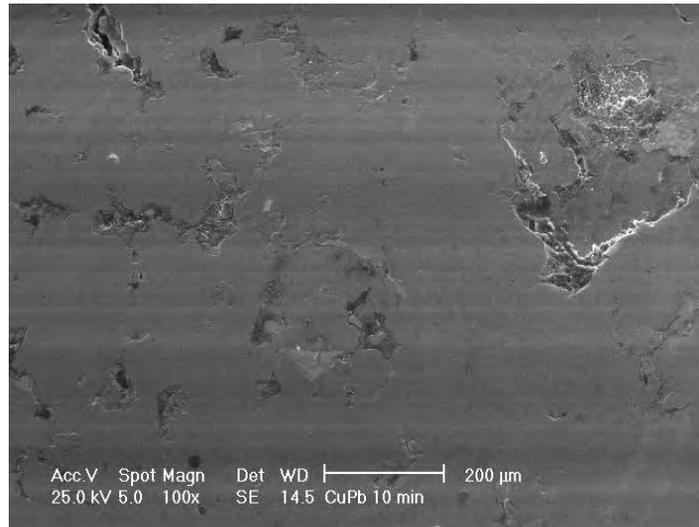


Figura 4.34 Superficie ensayada de aleación CuPb, apenas es posible observar los surcos dejados por el ensayo tribológico.

En la Figura 4.35 se aprecia el centro de la huella con una marca generada por el indentador del microdurómetro. En contraste con la aleación SAE 783, la microindentación no generó fractura en el material, lo que revela el nivel de ductilidad en este material a pesar de la deformación plástica generada previamente por el perno durante el ensayo tribológico.

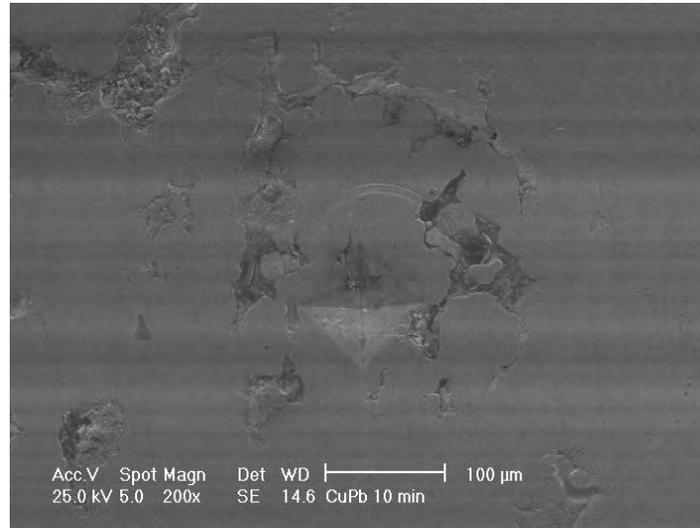


Figura 4.35 Microindentación en CuPb.

4.6.2 Evolución de las microestructuras

En la presente sección de resultados se muestran y describen microestructuras de las diversas microestructuras obtenidas a partir del ensayo tribológico a diferentes tiempos.

4.6.2.1 30 segundos de ensayo

En la Figura 4.36 correspondiente a 30 segundos de ensayo tribológico es posible apreciar la morfología característica de este material después de ser sometido al proceso de laminado y recocido que le proporciona las propiedades mecánicas óptimas para su utilización en cojinetes de deslizamiento. Se tienen porciones de estaño alargado en la dirección de laminado, también es posible apreciar una aglomeración de intermetálicos $Fe_{13}Al_4$ característicos de esta aleación [55].

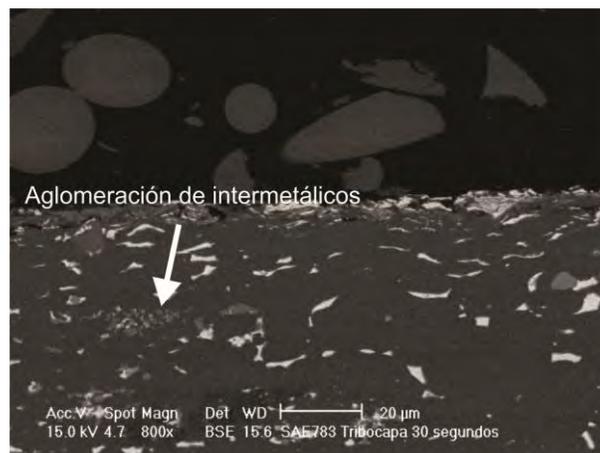


Figura 4.36 Microestructura de una probeta ensayada tribológicamente, se observa una aglomeración de intermetálicos.

El material previamente sometido al ensayo tribológico puede dividirse en tres zonas a lo largo de su espesor: en primer lugar se tiene la zona que ocupa la tribocapa, la cual se distingue por un color intermedio entre el gris oscuro del aluminio y el blanco característico del estaño, dentro de la zona de tribocapa se pueden tener porciones de estaño o aluminio que no forman parte de la mezcla mecánica. Por debajo de la tribocapa se tiene una zona de deformación plástica la cual se caracteriza porque el estaño ha tomado una forma alargada adoptando un patrón de flujo impuesto por el perno durante el ensayo tribológico. Finalmente se tiene el material base, compuesto por una matriz de aluminio donde abundan partículas de estaño y en menor medida intermetálicos (Figura 4.37).

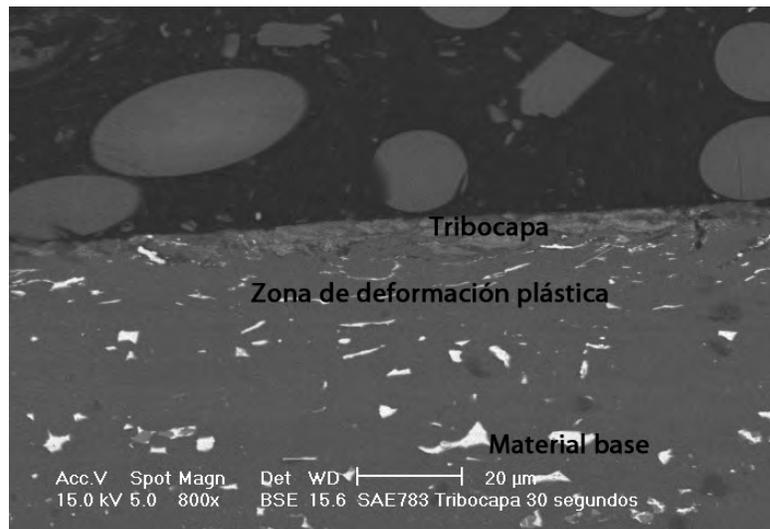


Figura 4.37 Zonas presentes en una probeta ensayada tribológicamente.

Se puede observar claramente la zona donde la tribocapa se ha formado, así como la deformación plástica generada a partir del proceso de desgaste, la cual se caracteriza por el patrón de flujo que ha adoptado, el cual se amolda a la tribocapa y a la superficie del material tribológico (Figura 4.38).

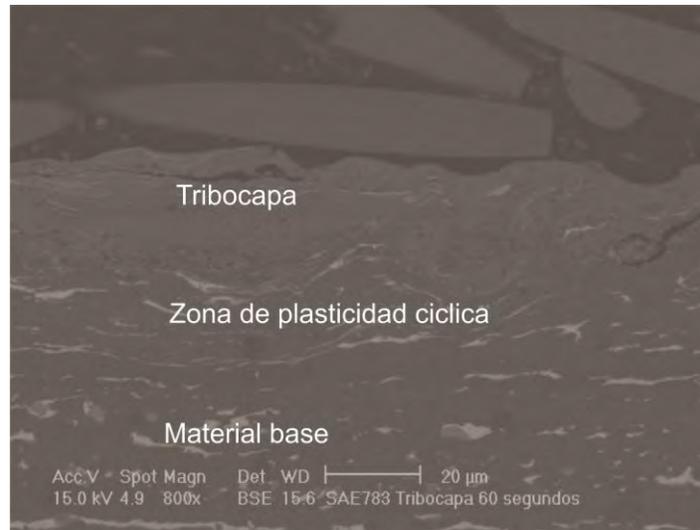


Figura 4.38 Detalle de la zona de deformación plástica.

En la Figura 4.39 es más fácil apreciar el patrón del flujo que adopta el material que se encuentra entre la tribocapa y el material base, se observa claramente una zona de deformación plástica donde se forman nuevamente listones continuos de estaño, los cuales disminuyen su espesor en comparación con el material base.

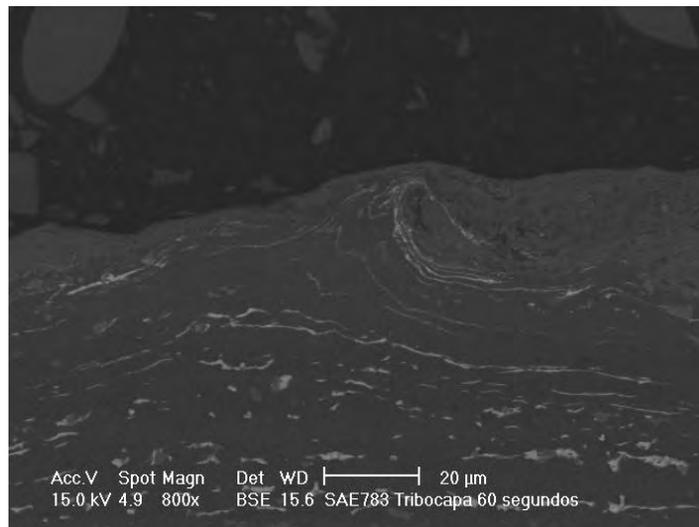


Figura 4.39 Patrón de flujo presente en la zona de deformación plástica.

Aunque no fue un comportamiento común para la probeta correspondiente a 30 segundos de ensayo, se tuvo una zona donde un fragmento de tribocapa se desprendió y provocó un agrietamiento severo hacia la zona de plasticidad ciclica

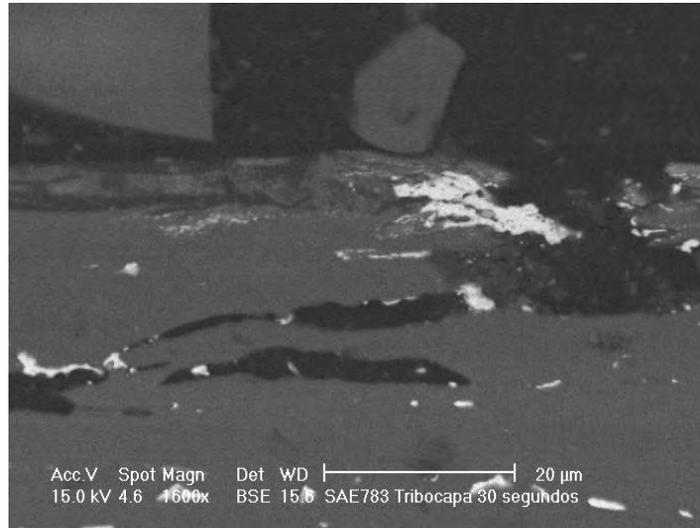


Figura 4.40 Zona rica en Sn en una probeta ensayada 30 segundos.

Un fenómeno diferente se muestra en la Figura 4.41, la morfología que adopta el estaño cercano a la tribocapa es característica de un proceso difusivo. Es decir; en algún momento durante el proceso de deformación plástica provocado por el perno, el estaño formó parte de la mezcla mecánica, pero debido a un proceso difusivo salió de la misma adoptando la morfología mostrada [63].

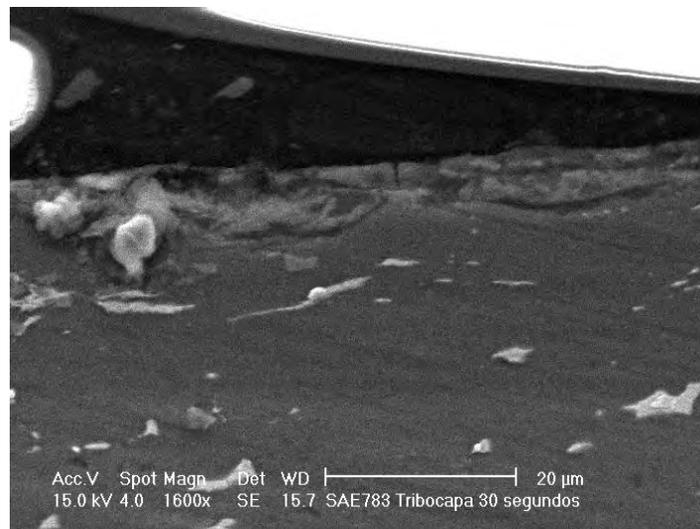


Figura 4.41 Sn cercano a la zona de tribocapa, se observa Sn que salió de la tribocapa debido a un proceso difusivo.

4.6.2.2 60 segundos de ensayo

Las micrografías obtenidas para las probetas ensayadas durante 60 segundos revelan que además de los fenómenos mostrados en el grupo anterior, se presentaron algunas situaciones adicionales que se mencionarán a continuación.

De igual forma que en las probetas ensayadas durante 30 segundos, los ensayos a 60 segundos generaron una tribocapa seguida de una zona de deformación plástica y finalmente la conservación del material base. Es posible observar falta de homogeneidad en el espesor de la tribocapa, esto se puede relacionar con los diversos surcos que se han podido observar en la superficie del material (Figura 4.42).

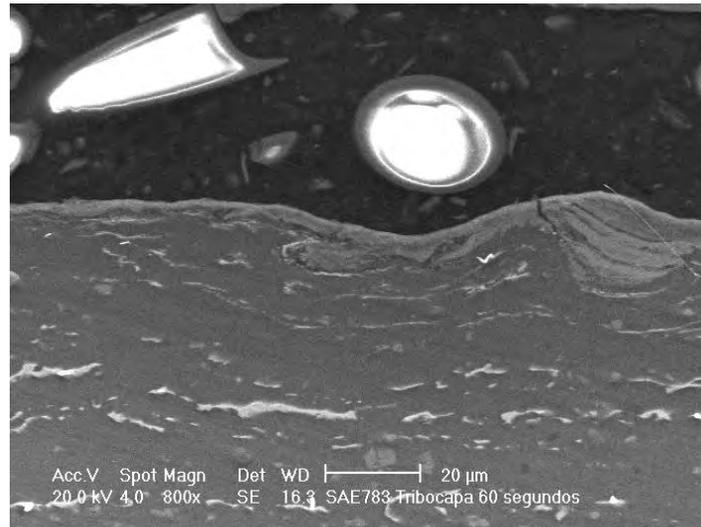


Figura 4.42 Tribocapa de diversos espesores.

En la zona donde la tribocapa presenta mayor espesor es posible observar una grieta que divide a la misma, sobre la grieta se pueden observar porciones de estaño que de igual forma que en la tribocapa formada por 30 segundos de ensayo son producto de efectos difusivos (Figura 4.43).

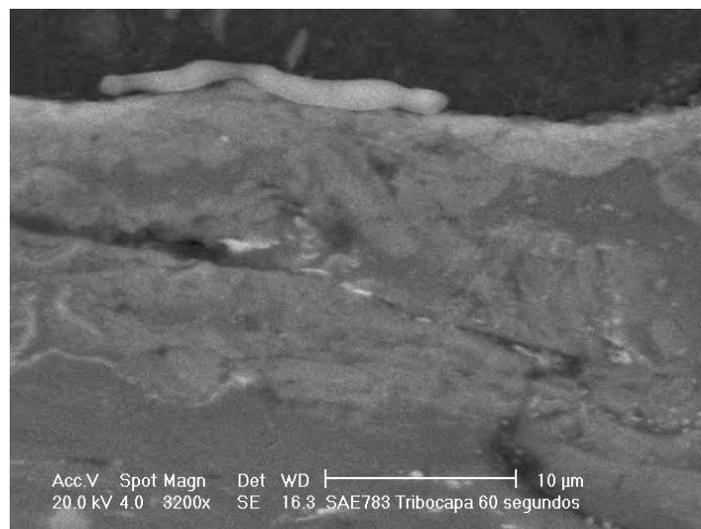


Figura 4.43 Tribocapa dividida por grieta.

Como ya se ha mencionado la tribocapa se divide en zonas donde presenta mayor espesor o prácticamente nulo. Tal es el caso de la Figura 4.44 donde se puede observar una porción de tribocapa homogénea interrumpida por una zona donde sólo se tiene deformación plástica. Este comportamiento se presenta frecuentemente a partir de 60 segundos de ensayo tribológico.

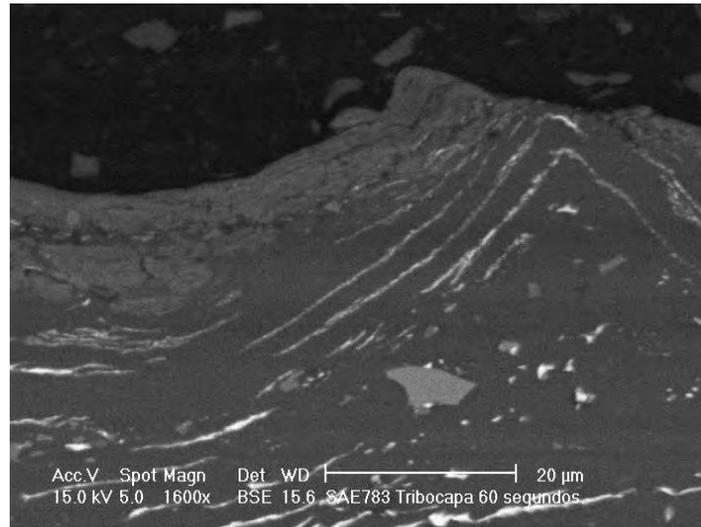


Figura 4.44 Tribocapa interrumpida por flujo de material deformado plásticamente.

En la zona que divide a la tribocapa de la zona de deformación plástica es posible observar asentamientos de estaño que no han llegado a formar parte de la zona de mezcla mecánica. También se aprecia una tribocapa dividida por un número considerable de grietas cuyo espesor es nanométrico (Figura 4.45).



Figura 4.45 Sn que no formó parte de la tribocapa.

Resultado de la presión que ejerce el perno sobre la tribocapa ya formada, se observan grietas de gran espesor que dividen la tribocapa en dos. En el caso de la Figura 4.46, la grieta se propaga por todo el espesor de la tribocapa con un ángulo de 45° grados y es resultado de una excesiva deformación en la superficie.

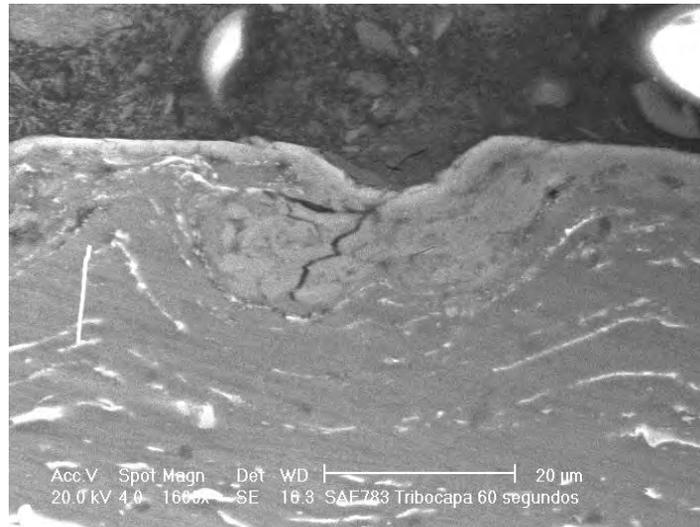


Figura 4.46 Agrietamiento que divide tribocapa.

4.6.2.3 120 segundos de ensayo

En las tribocapas formadas a partir de 120 segundos de ensayo se aprecian zonas de mezcla mecánica cuya extensión es mayor que las correspondientes a 30 y 60 segundos. Sin embargo, su espesor no varía con respecto a los anteriores tiempos de ensayo.

En la Figura 4.47 se puede observar una zona de deformación plástica muy bien definida por medio de un flujo de material el cual se ha desarrollado a partir del giro del perno y de la presión que la tribocapa ha ejercido sobre el material base. En la tribocapa siguen presentándose las grietas previamente mencionadas.

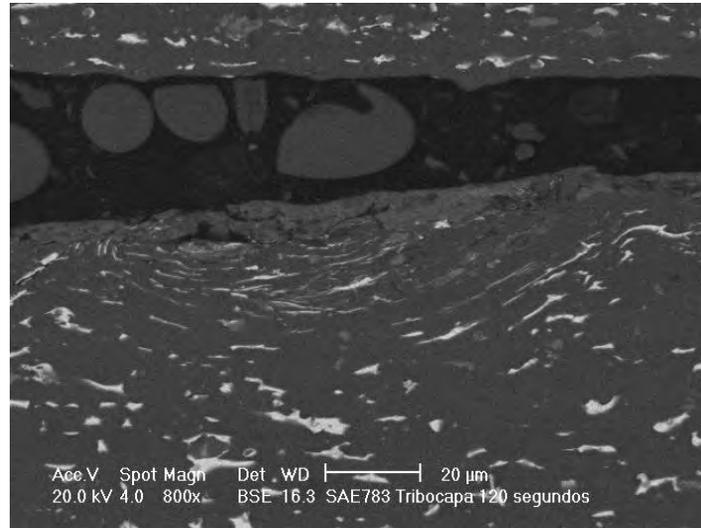


Figura 4.47 Tribocapa y zona de deformación plástica bien definidas.

En la Figura 4.48 se puede observar una zona donde se ha desprendido una porción de tribocapa, se observa la zona de deformación plástica que usualmente se encuentra bajo la zona de mezcla mecánica.

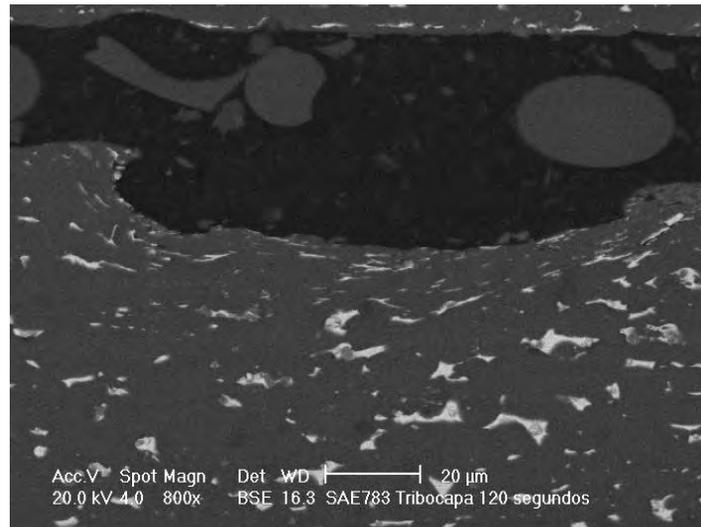


Figura 4.48 Desprendimiento de tribocapa, la zona de deformación plástica llega a la superficie del material.

Junto a la zona donde la tribocapa fue removida se aprecia un relieve de material mezclado y una división a lo largo del mismo, lo que sugiere que la tribocapa se ha depositado en otra zona del mismo material, es decir; el material simplemente se ha levantado e incrustado en otra zona.

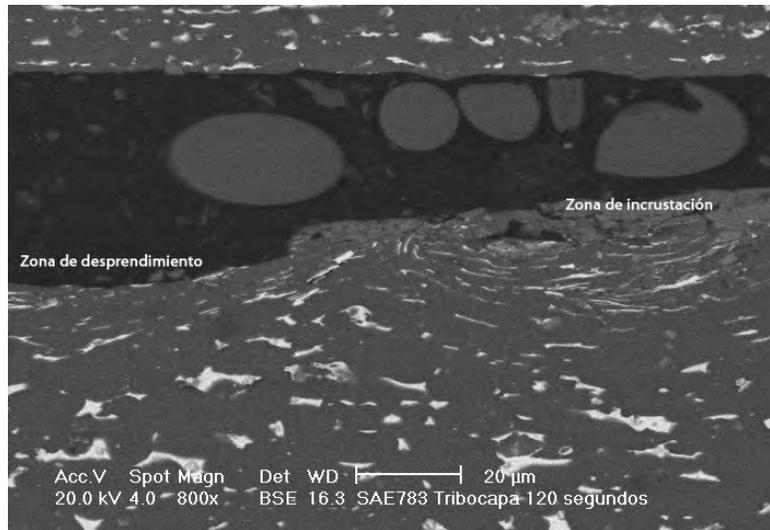


Figura 4.49 Desprendimiento e incrustación de tribocapa.

Una tribocapa en proceso de formación se puede observar en la Figura 4.50, se pueden apreciar partículas de material mezclado que se van depositando en una zona específica. Es posible apreciar la zona de deformación plástica.

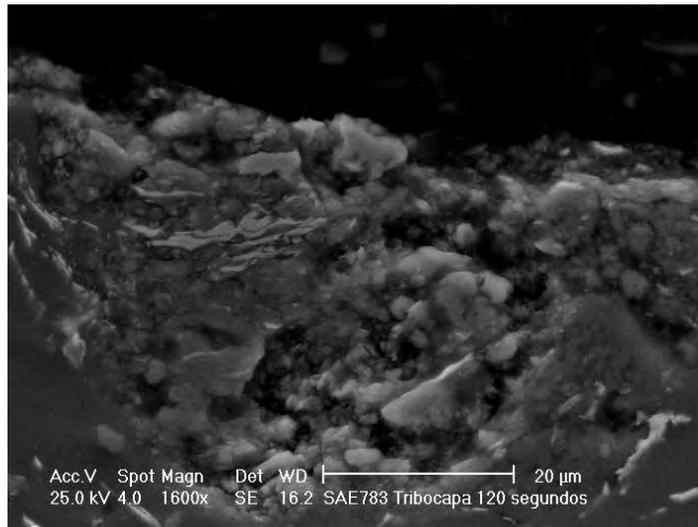


Figura 4.50 Tribocapa en proceso de formación.

De igual forma que en las probetas correspondientes a las tribocapas formadas con 60 segundos de ensayo tribológico, se han presentado secciones del material donde la zona de deformación plástica llega a la superficie debido al flujo que el perno impone sobre el material tribológico, este fenómeno provoca interrupciones en la extensión total de la tribocapa.

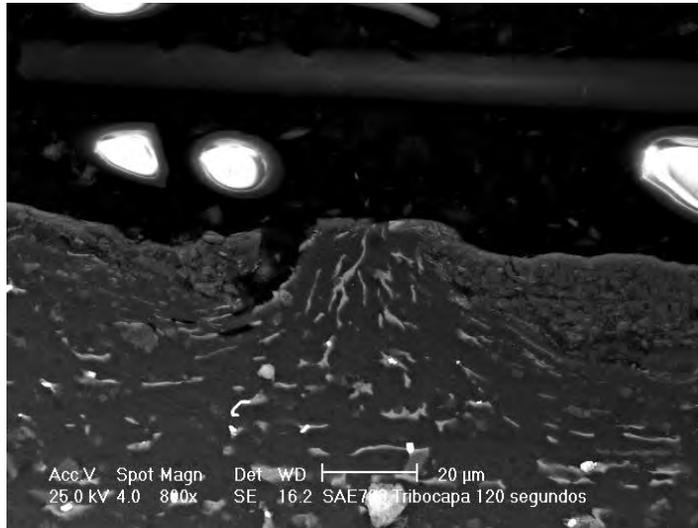


Figura 4.51 Tribocapa interrumpida por flujo de material deformado plásticamente.

Un fenómeno interesante se muestra en la Figura 4.52, donde una tribocapa bien formada se encuentra rodeada por material cuya estructura y morfología corresponde a la zona de deformación plástica. Por arriba de la zona de listones alargados de estaño que se encuentran depositados en una matriz de aluminio es posible ver una delgada tribocapa en proceso de formación.

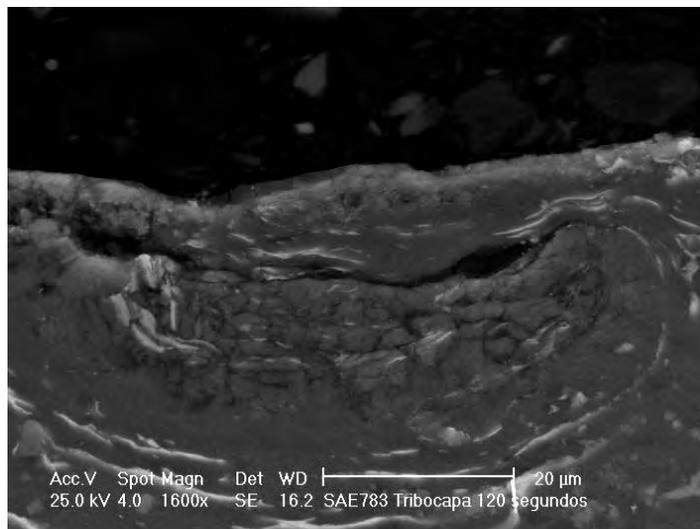


Figura 4.52 Tribocapa rodeada por material deformado plásticamente.

Lo mostrado en las Figuras 4.51 y 4.52 seguramente es resultado de la incrustación de la tribocapa bien formada dentro de la zona de deformación plástica, posteriormente y debido a que el ensayo continuaba se comenzó a formar una nueva tribocapa que no llegó a madurar completamente.

4.6.2.4 240 segundos de ensayo

Zonas de tribocapa continua y de pequeño espesor se aprecia en las probetas ensayadas durante 240 segundos. Se observan pequeñas grietas en las zonas donde se encuentran listones alargados de estaño producto de la deformación plástica (Figura 4.53).

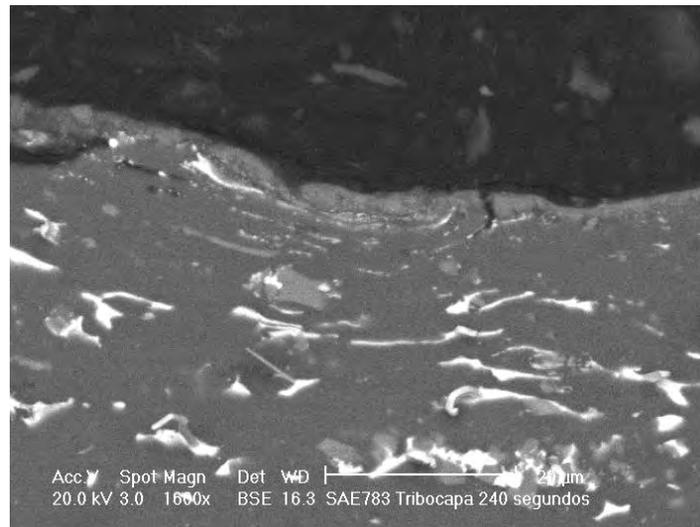


Figura 4.53 Estructura de material ensayado durante 240 segundos.

En la Figura 4.54 se aprecia una tribocapa dividida por una macro-grieta de aproximadamente 60 µm de longitud. La tribocapa que se encuentra por debajo de la grieta está completamente formada. La tribocapa que se encuentra en la parte superior de la grieta está en proceso de formación mediante depósito de partículas.



Figura 4.54 Tribocapa dividida por una grieta.

Otra zona de tribocapa en formación se puede apreciar en la Figura 4.55, en este caso ocurre un fenómeno diferente al mostrado en la Figura 4.54. Los fragmentos de tribocapa en formación se han depositado por debajo de la tribocapa completamente formada. Esta situación genera severos agrietamientos en la tribocapa completamente formada.

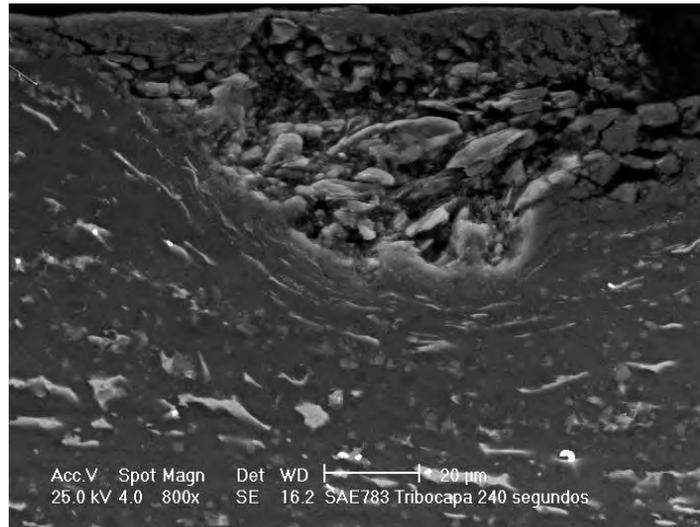


Figura 4.55 Tribocapa en formación y tribocapa completamente formada, las partículas de la tribocapa que se está formando se depositan debajo de la tribocapa formada, esto debido a que el material se levanta durante el ensayo.

Como en casos anteriores, el material de la zona de deformación plástica tiende a ir hacia la superficie interrumpiendo la continuidad de la tribocapa, se aprecia una zona de deformación plástica de poco espesor, además de un depósito grande de intermetálicos en el material base (Figura 4.56).

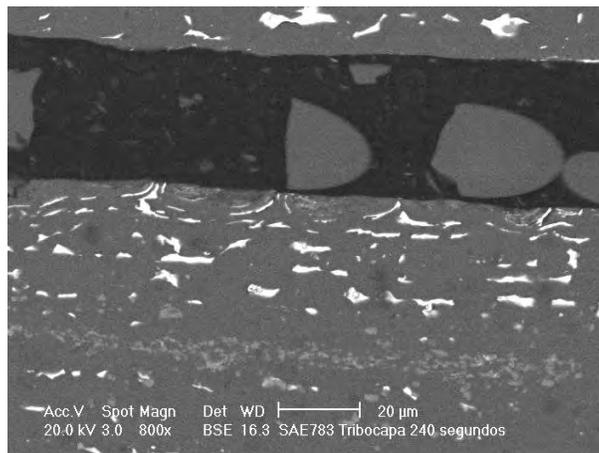


Figura 4.56 Tribocapa discontinua a causa del flujo de la zona de deformación plástica, debajo del material sin deformar se tiene una gran aglomeración de intermetálicos.

A mayores aumentos en la misma zona (Figura 4.57) puede observarse que partículas de estaño se presentan en los alrededores de la tribocapa, como ya se mencionó; la morfología de dichas partículas corresponde a material que se separa de la tribocapa por procesos difusivos activados por procesos térmicos [64, 65].

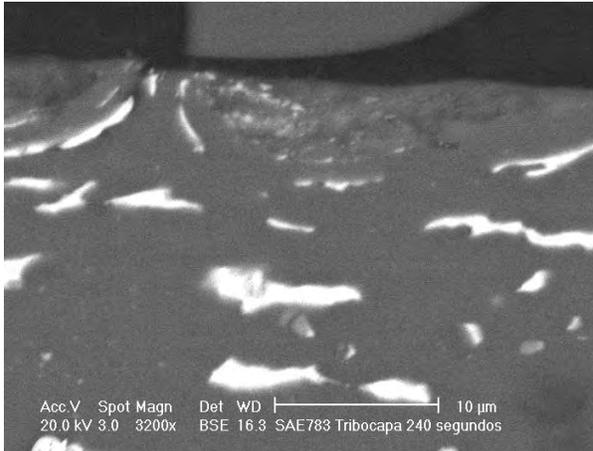


Figura 4.57a Estaño que difunde en la zona de tribocapa.

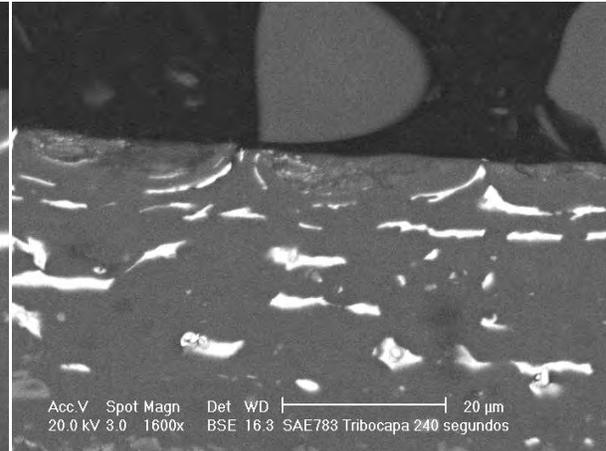


Figura 4.57b Estaño que difunde en la zona de tribocapa.

Un fenómeno que se ha venido observando a lo largo de la evolución de las tribocapas desde su formación en probetas ensayadas durante 30 segundos ha sido la delaminación producto de la inserción de listones de estaño [66]. En la Figura 4.58 se puede observar agrietamiento severo del material en zonas donde el estaño está presente. Esta delaminación puede ser el inicio de desprendimiento de material, lo cual es común en ensayos mayores a 60 segundos.

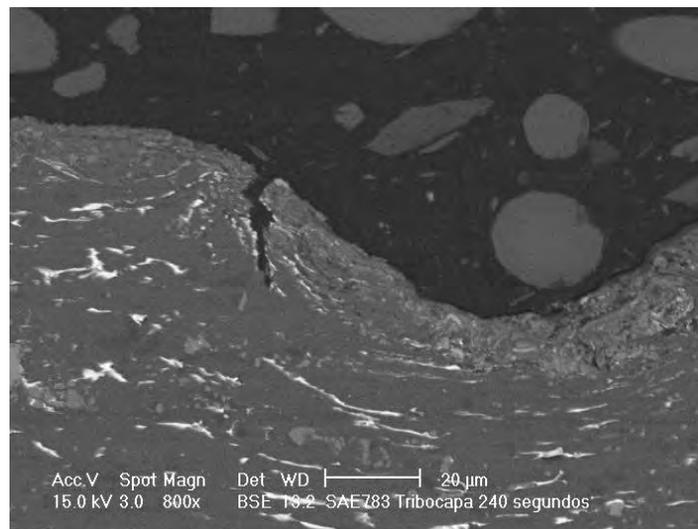


Figura 4.58 Delaminación en tribocapa.

En la Figura 4.58 se tiene un agrietamiento causado por delaminación, donde como en cada caso se tienen presentes listones de estaño en la zona de fractura.

4.6.2.5 480 segundos de ensayo

En las probetas correspondientes a 480 segundos de ensayo no se aprecian cambios significativos con respecto a 240 segundos, de igual forma que en los casos anteriores; el flujo de material de la zona de deformación plástica llega hasta la superficie y se tienen grietas que separan la tribocapa (Figura 4.59).

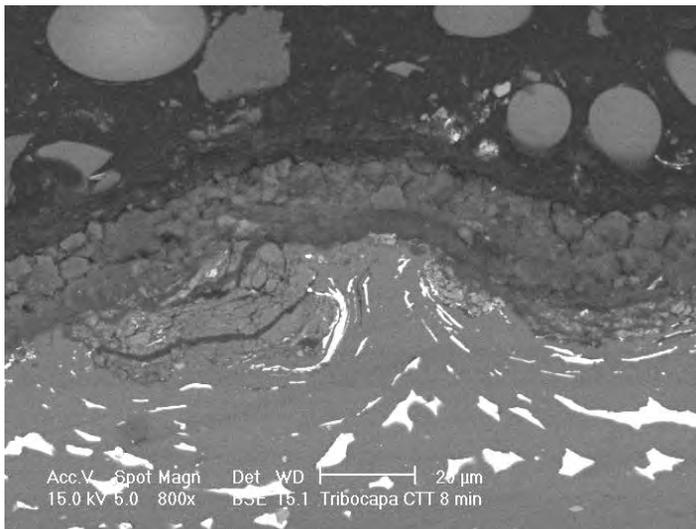


Figura 4.59 Flujo de listones de estaño hacia la superficie.

Gruesos listones de estaño que no llegaron a formar parte de la tribocapa delimitan la zona de mezcla mecánica y la de deformación plástica. En la Figura 4.60 se aprecia una estructura granular en la tribocapa, además de un severo agrietamiento característico de la mezcla mecánica.

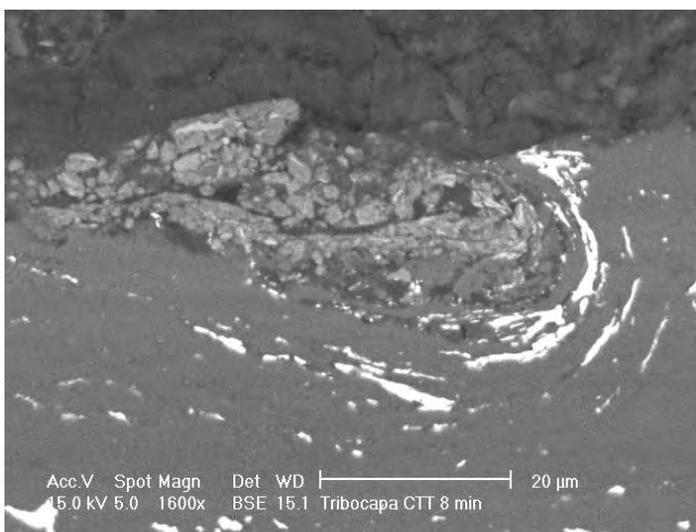


Figura 4.60 Zona rica en estaño que normalmente se presenta cerca de la tribocapa.

En la Figura 4.61 se muestran tres grandes zonas de delaminación bien definidas fuera de la tribocapa; se aprecian los listones alargados de estaño dentro las grietas. En la zona de mezcla mecánica se pueden ver delgados listones de estaño que no se mezclaron para formar la tribocapa. La estructura de la tribocapa se aprecia severamente agrietada y bien conformada a raíz de la aleación mecánica.

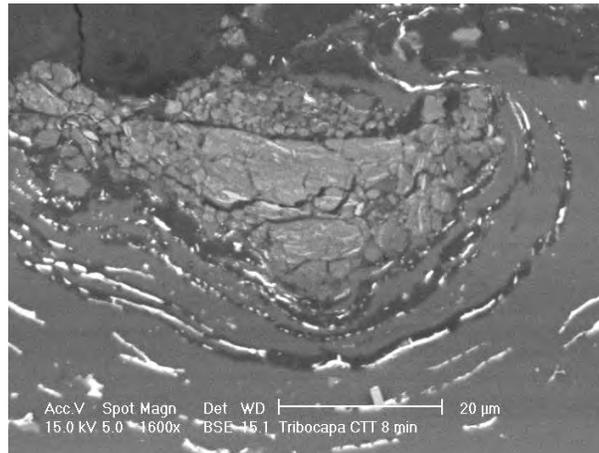


Figura 4.61 Tres zonas de delaminación, todas delimitadas por listones de estaño.

4.6.2.6 600 segundos de ensayo

En general el espesor de la tribocapa se encuentra entre 10 y 20 micrómetros, lo más común es encontrar tribocapas divididas por una grieta y cada una de las partes que la conforman no sobrepasan los 12 micrómetros. En la Figura 4.62 se muestra una tribocapa generada a partir de un ensayo tribológico cuya duración fue de 10 minutos y en donde se puede apreciar la división antes mencionada. Aunque la tribocapa en este caso es homogénea, es posible encontrar zonas de mezcla mecánica más ricas en estaño o en aluminio.

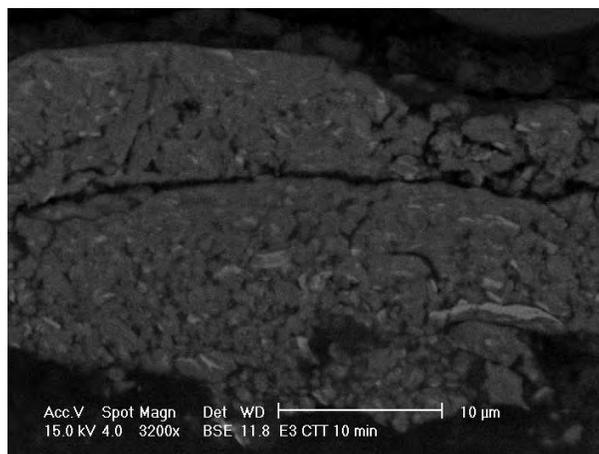


Figura 4.62 Tribocapa dividida por un grieta.

Pequeñas zonas de delaminación se observan, las cuales se fueron una constante para todos los tiempos de ensayo, igual que el flujo de material deformado plásticamente.

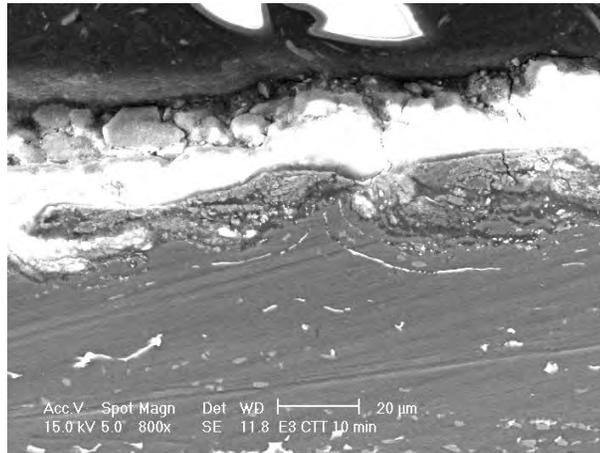


Figura 4.63 Delaminación y flujo de material deformado.

4.6.2.6 Material sin tratamiento térmico

Como se mencionó anteriormente, el material al que no se le aplicó tratamiento térmico no presentó las mismas características durante el ensayo tribológico que el material previamente recocido. Sin embargo, la formación de tribocapa también se hace evidente en este material.

En la Figura 4.64 se puede observar una tribocapa bien definida en el material sin tratamiento térmico, se aprecian las tres zonas características del material ensayado, es decir: tribocapa o zona de mezcla mecánica, zona de material base y zona de deformación plástica.

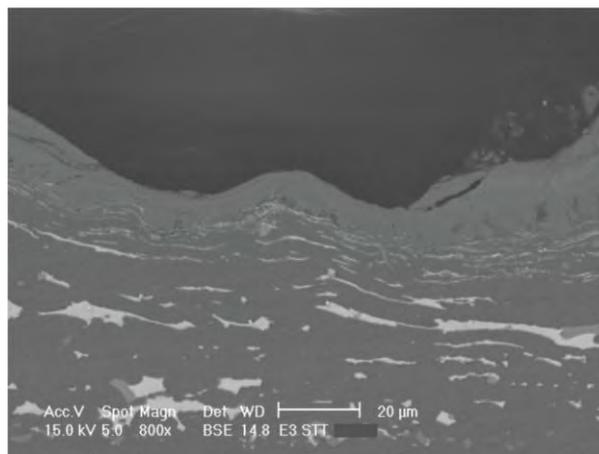
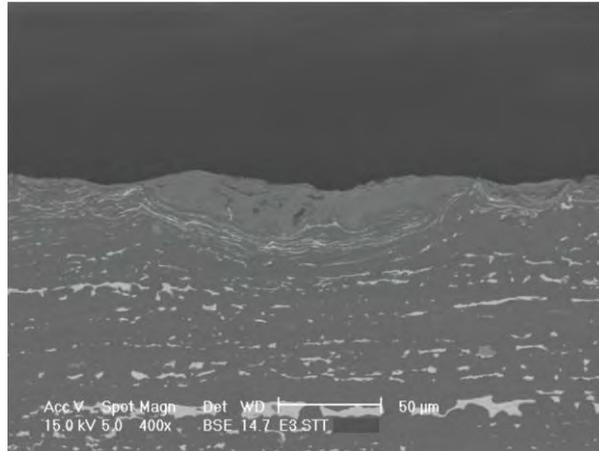


Figura 4.64 Tribocapa en material sin tratamiento térmico.

A diferencia que con el material previamente recocido, la tribocapa formada en el material sin tratamiento térmico no es homogénea a lo largo de la sección, es decir, sólo se forma en algunas partes del material y muestra diferentes espesores. En la Figura 4.65 se muestra una zona de tribocapa con diferentes espesores.



4.65 Tribocapa con diferentes espesores, material sin tratamiento térmico.

En el material con estas características también es posible observar flujo plástico rotacional. Una zona interesante se aprecia en la Figura 4.66, donde el flujo se ha detenido mientras el material se deforma. Basándose en el comportamiento observado durante el ensayo tribológico y lo previamente mostrado en las superficies correspondientes a éste material, es posible asumir que lo que se aprecia es la zona donde el material se ha “amarrado”

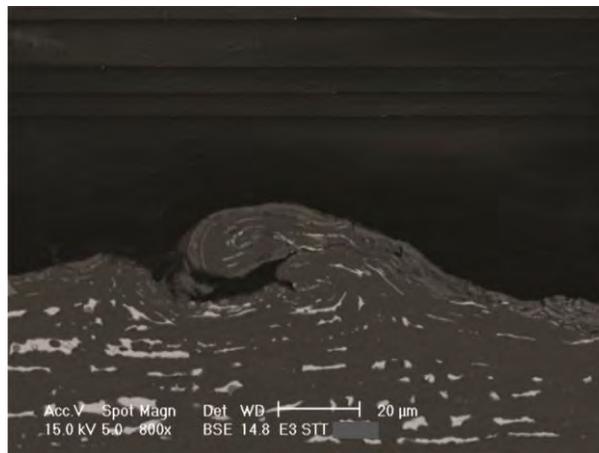


Figura 4.66 Tribocapa y flujo plástico en material sin tratamiento térmico.

4.6.3 Perfil de indentaciones

Con la finalidad de observar el comportamiento de la zona de tribocapa ante sollicitaciones mecánicas tales como microindentaciones, se observó el perfil de una tribocapa generada mediante 60 segundos de ensayo tribológico y posteriormente micro-indentada, lo anterior me muestra en la Figura 4.67.

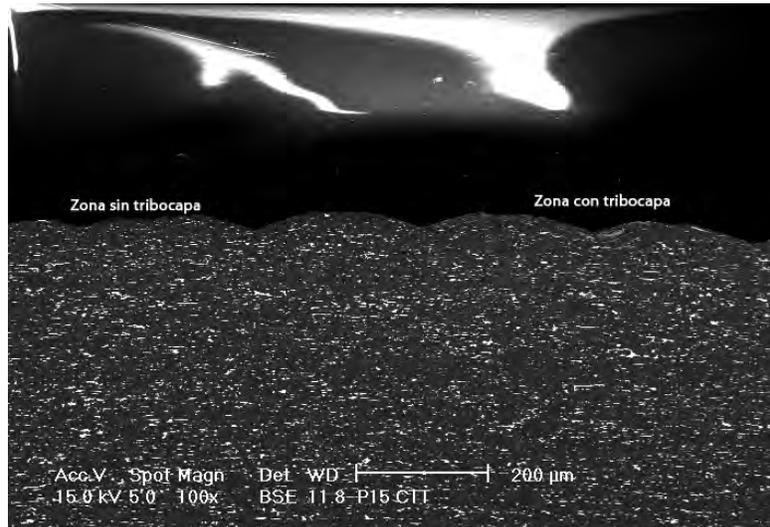


Figura 4.67 Microindentaciones en la superficie del material.

En la zona donde el material no fue ensayado tribológicamente se logran apreciar grietas producto de delaminación provocada por el estaño e impulsada a partir de la indentación, esto se hace evidente ya que en la zona de punta del indentador se puede ver una grieta que corre con la misma dirección que el estaño ahí depositado (Figura 4.68).

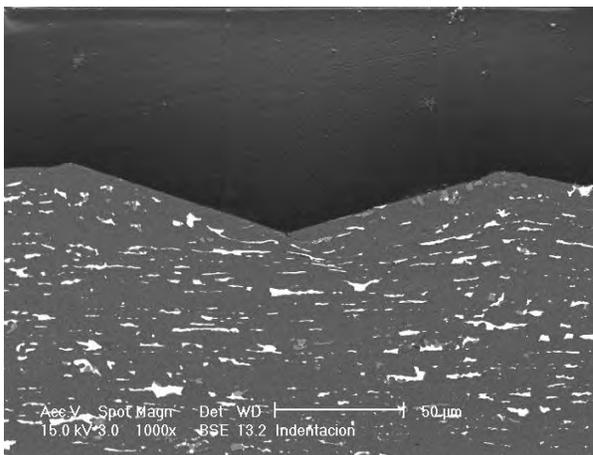


Figura 4.68a Microindentación en zona sin tribocapa.

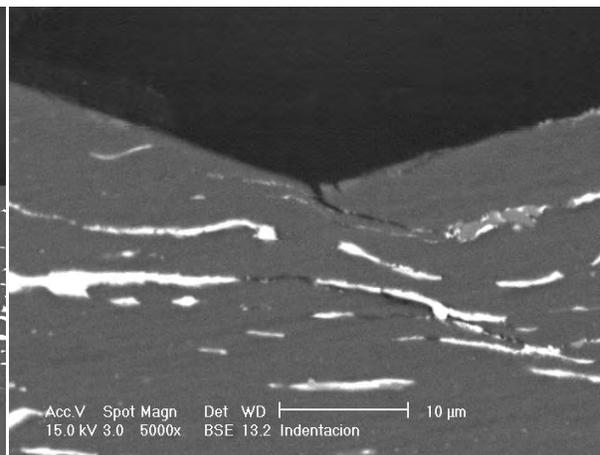


Figura 4.68b Microindentación en zona sin tribocapa.

En la Figura 4.69 se muestra la indentación sobre una zona de tribocapa y se revela que el material se deforma plásticamente al ser indentado, es decir; el indentador no atraviesa la tribocapa.

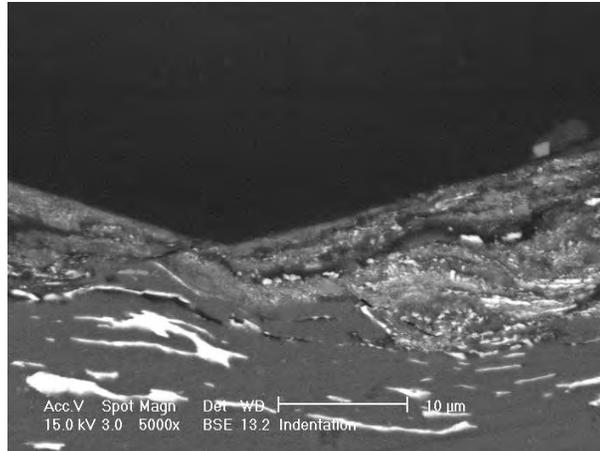


Figura 4.69 Microindentación en zona con tribocapa.

En la Figura 4.70 se puede observar delaminación en la dirección del estaño, la cual generó una grieta de tamaño considerable que dio como resultado la división de la tribocapa. Más abajo una zona rica en estaño que ha adoptado la dirección de flujo de la zona deformada plásticamente se ha separado de la tribocapa como consecuencia de un severo agrietamiento.

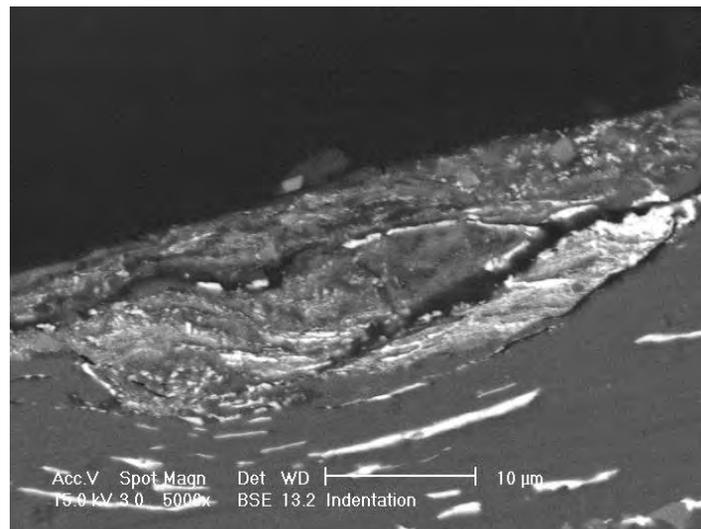


Figura 4.70 Zona deformada por el ensayo tribológico y por la microindentación.

Capítulo 5. Discusión

5.1 Ensayo tribológico

En el ensayo tribológico realizado tal como se ha diseñado el equipo es posible variar tres parámetros los cuales son:

1. Carga aplicada.
2. Velocidad de giro.
3. Tiempo de ensayo.

Basado en resultados mostrados en trabajos previos, se decidió que durante el ensayo tribológico se utilizaría solamente un valor de carga, el cual fuera suficiente para deformar plásticamente el material sometido a estudio y de esta manera lograr la mezcla mecánica necesaria para la formación de las tribocapas deseadas. Otra razón por la cual se decidió que una de las variables que no se modificó a lo largo de la serie de ensayos tribológicos fuera la carga aplicada, es que en resultados previamente reportados por Andresen [42] se demostró que el único parámetro que varía al modificar la carga es el espesor de la tribocapa. Otro parámetro que se mantuvo constante fue la velocidad de giro del perno, ya que el tribómetro coaxial utilizado muestra una óptima estabilidad tanto estructural como en la medición al realizar el ensayo con la velocidad establecida. Un punto que vale la pena mencionar es que el incremento de la temperatura al ensayar con la carga y velocidad de giro establecida no afecta el comportamiento tribológico de la aleación [42]. Esta metodología experimental da como ventaja la posibilidad de poder evaluar el proceso tribológico manteniendo como variable sólo uno de los parámetros del ensayo, en este caso el tiempo.

La posibilidad de variar la carga aplicada y la velocidad del giro del perno dota al tribómetro coaxial de gran cantidad de posibles combinaciones con las cuales realizar el ensayo tribológico, esto sin duda representa interesantes oportunidades de investigación a futuro, ya sea con aleaciones tribológicas clásicas como la utilizada en el presente trabajo y donde aún no se conoce el efecto de la velocidad de deformación durante el proceso de formación de tribocapas, o con nuevas aleaciones desarrolladas expresamente para ser utilizadas en cojinetes de deslizamiento, en las cuales la variación de los tres parámetros controlables con el tribómetro coaxial sin duda arrojarían resultados muy interesantes.

Aunque las condiciones del ensayo en el tribómetro coaxial no reproducen el comportamiento de la aleación al ser utilizada en cojinetes de deslizamiento, las pruebas realizados en el mismo muestran la respuesta que se tiene bajo condiciones extremas de utilización y que se presentan al arranque y apagado del motor de combustión interna, así como cuando el sistema de lubricación presenta alguna falla. En este contexto es importante mencionar la oportunidad de mejora que se tiene al haber comprobado la eficiencia del equipo bajo las condiciones aplicadas en el presente trabajo. La instalación de un sistema de lubricación hidrodinámico permitiría la realización de un análisis tribológico más profundo, el cual no sólo incluiría la caracterización de la aleación tribológica, sino que también abriría las puertas para la realización de un estudio reológico en el sistema.

Para llegar a los espesores utilizados en la fabricación de cojinetes de deslizamiento cuya aleación funcional es Al – Sn o Al – Sn - Si, se requiere de un proceso de laminación, el cual además de cambiar las dimensiones geométricas del material, modifica las propiedades mecánicas del mismo, ya que éste se ve endurecido por el proceso de trabajo en frío. Durante el proceso de manufactura también se requiere de un recocido que de igual manera intervendrá en las propiedades mecánicas del material. Este tratamiento térmico no se aplicó a parte del material sometido a ensayo en el presente trabajo y el resultado fue más significativo de lo que se esperaba.

La compatibilidad tribológica, entendida como la capacidad del material funcional para no adherirse con su contraparte, en este caso con el perno de acero utilizado en los ensayos, ha quedado evidenciada en el caso de la aleación SAE 783 sometida al proceso termomecánico completo, es decir: laminación y recocido. Se ha observado que el material es capaz de resistir las tasas de desgaste y no presenta un comportamiento que resultaría catastrófico en un motor de combustión interna, específicamente un proceso de amarre provocado por el exceso de adhesión y abrasión entre ambos componentes del tribopar. Lo anterior se puede constatar a partir de las Figuras 4.18 y 4.19, donde el material ha sido deformado plásticamente, logrando así la mezcla mecánica y formación de tribocapa. Este material ha sido capaz de soportar 10 minutos de ensayo tribológico a una carga y velocidad de giro constante sin llegar a presentar fuertes daños en la superficie.

Lo descrito en el párrafo anterior contrasta con las pobres propiedades tribológicas mostradas por la aleación SAE 783 sin recocido, con la cual no fue posible completar el tiempo de ensayo tribológico deseado debido a un proceso de “amarre” resultado de un exceso de adhesión y abrasión sufrida por el material funcional. Sin embargo, estos resultados son consistentes, ya que al tenerse un material dúctil como el previamente sometido a tratamiento térmico, el proceso de deformación plástica por medio del cual se crea la tribocapa se lleva a cabo más fácilmente. La resistencia mecánica y dureza del material sin tratamiento térmico provoca que el perno de acero se “amarre”, al grado de tener deformaciones tan grandes que al generar vibración llegan a provocar inestabilidad en

el sistema tribológico. Lo anterior se puede explicar a partir del endurecimiento por trabajo en frío que se generó durante el proceso de laminación [67]. El comportamiento durante el ensayo tribológico aplicado a la aleación SAE 783 sin tratamiento térmico se asemeja al observado al realizar un ensayo similar utilizando un tribopar acero – acero. Como era de esperarse, el daño fue tal que el sistema presentó gran inestabilidad la cual derivó en el amarre del material. Sin embargo, el daño superficial observado es muy diferente entre el acero y la aleación SAE 783 sin tratamiento térmico. En el acero se observó (Figura 5.1) que el método de desgaste dominante fue abrasivo, además, al separar el perno de la probeta fue posible ver exceso de partículas del material en forma de polvo, lo que sugiere un modo frágil de fractura.

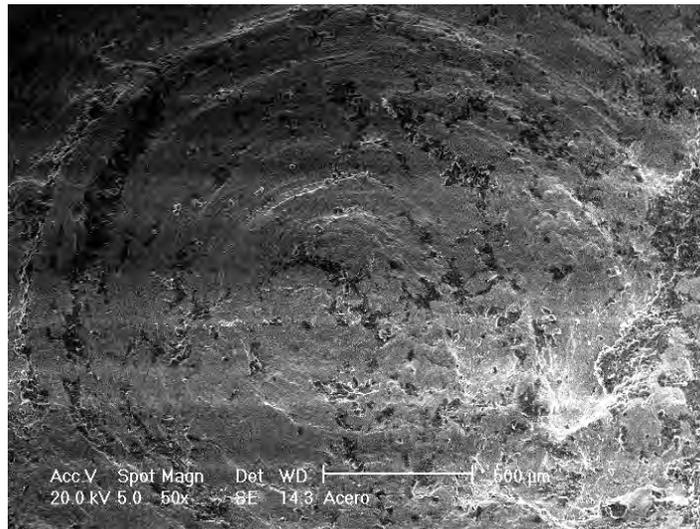


Figura 5.1 Desgaste en probeta de acero sometida a ensayo tribológico.

En el caso de la aleación SAE 783 sin tratamiento térmico; a pesar de que el material también se amarró, se observó que el modo de desgaste dominante fue adhesivo y el amarre se generó a partir de un exceso de deformación plástica que derivó en el desprendimiento de partículas que posteriormente se incrustaron en el material y que provocaron abrasión. Esto se puede apreciar en las Figuras 4.31, 4.32 y 4.33.

Aunque la obtención de propiedades mecánicas mediante el ensayo de tracción arrojó que el material sin recocer presenta una mayor resistencia, los requerimientos en cojinetes de deslizamiento también se cumplen en el caso del material con recocido, por lo que aunque se tenga una menor resistencia mecánica se debe optar por la utilización de material sometido al proceso termomecánico completo, es decir: con tratamiento térmico.

La medición directa de deformaciones con la finalidad de aplicar una carga controlada permite tener certeza respecto al valor de la misma, algo que sin duda es de suma importancia para la obtención de resultados confiables y que puedan ser comparados

con otros métodos de caracterización. Ya sea con galgas extensiométricas o con celdas de carga comerciales, este método de medición presenta gran confiabilidad debido a su precisión y exactitud. Sin embargo, es importante señalar que la instrumentación utilizada en el tribómetro coaxial basa su confiabilidad en la estabilidad estructural del sistema completo, entiéndase: sistema de aplicación de carga, sistema de transmisión y sistema de adquisición de datos. Lo anterior limita al equipo a no poder realizar una retroalimentación automática, lo cual permitiría modificar los valores de carga durante el ensayo y así poder establecer un valor de este parámetro al cual el sistema presente cambios durante el ensayo. Aunque la implementación de este sistema no es un tema propio de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, sin duda representa una gran oportunidad en el campo de la Ingeniería Mecánica para poder mejorar la metodología de caracterización.

Todo lo anteriormente mencionado conduce a que la aleación SAE 783 sometida al proceso termomecánico, brinda la compatibilidad necesaria para ser utilizada en cojinetes de deslizamiento.

5.2 Proceso de desgaste

En el capítulo anterior se mostraron algunos de los resultados más representativos de la presente investigación. Como se menciona en el capítulo 2, la caracterización de procesos donde se presentan fenómenos tales como la fricción y el desgaste requiere de una gran variedad de experimentación y análisis estadístico. En la presente obra el desgaste se evalúa a partir de la medición de las masas antes y después del ensayo tribológico, así como mediante la obtención de perfiles de rugosidad en las zonas dañadas y las no dañadas.

Como se mostró en la Tabla 4.1, no se presentó cambio significativo en las probetas cuya masa fue medida por medio de la balanza de precisión. La resolución de dicha balanza es de 0.0001 g y los cambios en las masas no son mayores a 0.0003 g por lo que la diferencia puede ser atribuible a pequeñas partículas ajenas a las probetas que se depositaron en las mismas o dentro de la cámara de la balanza, además de que no se tiene un patrón que sugiera la transferencia de material del perno hacia las probetas o de forma inversa.

La constancia en los valores de rugosidad promedio previa al ensayo tribológico para cada una de las probetas permite una comparación satisfactoria posterior al mismo, esto dio la oportunidad de obtener una medición de rugosidad relativa a la inicial, la cual arrojó como resultado que la rugosidad se incrementa desde 5 veces en un ensayo cuya duración fue de 30 segundos, hasta cerca de 54 veces en un ensayo cuya duración fue de 600 segundos. El parámetro a comparar con la rugosidad promedio inicial fue la rugosidad promedio de cada probeta después del ensayo (Figura 5.2).

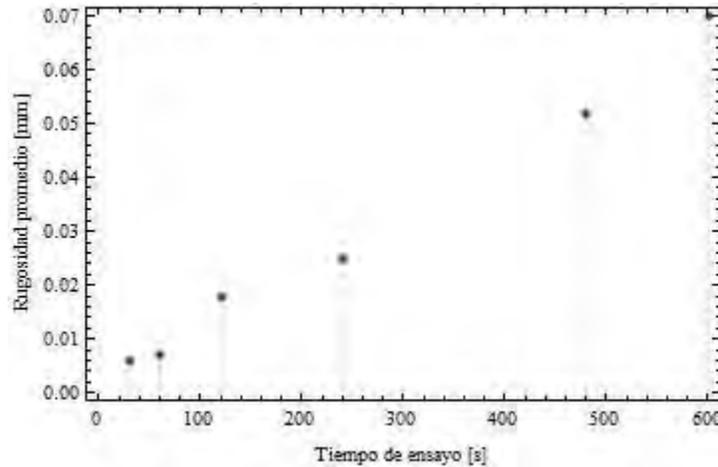


Figura 5.2 Rugosidad promedio de las probetas después de ser ensayadas.

El aumento directamente proporcional del valor de la rugosidad promedio y rugosidad máxima con respecto al tiempo de ensayo, así como cada uno de los perfiles de rugosidad obtenidos sugieren que el material ha sido desplazado desde el centro de la probeta hacia el exterior por acción del giro del perno. Lo anterior es coincidente con la conservación de masa que ya se ha mencionado en el presente capítulo. El hecho de que el perno desplace el material implica que se tiene un flujo del mismo hacia el exterior de la huella. Cabe destacar que dos de las características deseadas en los cojinetes de deslizamiento y que fueron mencionadas en el capítulo dos; la incrustabilidad y conformabilidad, se pueden constatar a partir de la conservación en los valores de masas y en los perfiles de rugosidad que se han obtenido para el material ensayado. Por un lado, la incrustabilidad se hace evidente gracias a que se ha constatado que hay partículas que se desprenden y posteriormente se incrustan en el material, como ejemplo se puede tomar la Figura 4.49, donde se puede observar una zona de desprendimiento de material y una zona donde el mismo se ha incrustado. La conformabilidad se ejemplifica a partir de los perfiles de rugosidad, donde evidentemente el material se ha adaptado mediante deformación plástica a la presión que el perno ejerce sobre el material funcional.

5.3 Diámetros medidos y resultado de la simulación

El incremento en la longitud de los diámetros obtenidos a partir del proceso de desgaste es coincidente con lo expuesto en la sección anterior del presente capítulo, se tiene flujo de material que se incrementa conforme el tiempo de ensayo aumenta, lo que provoca acumulación de material y por ende éste continua desplazándose hacia el exterior.

La longitud del diámetro generado en un ensayo de 30 segundos es completamente coincidente con lo obtenido por medio de simulación, para mayores tiempos de ensayo la discrepancia es producto de que el modelo de la simulación se realiza a partir de un material elasto – plástico sin fluencia en el cual no se producen cambios en la deformación

del material a pesar de aumentar el tiempo de ensayo o la cantidad de giros del perno, contrario a lo que sucedería si se definieran propiedades de fluencia el material funcional [68]. Otro aspecto a considerar relacionado con el modelado y simulación es el proceso de desgaste. A pesar de la gran variedad de posibilidades que brinda el *software* Abaqus al definir un material y las condiciones mecánicas a las que éste sería sometido, el proceso de formación de tribocapas como el que se ha llevado a cabo en el presente trabajo es sumamente complejo en términos de modelado numérico. Para reproducir fehacientemente la mezcla mecánica y el desgaste, es necesaria la programación de subrutinas que permitan establecer las condiciones del ensayo y propiedades del material antes y después del giro del perno, así como el desplazamiento de elementos dentro de la misma probeta. La programación de este tipo de subrutinas en lenguaje Python no es un proceso simple y sin duda representa una gran oportunidad para la mejora en la simulación de procesos de desgaste.

Es importante señalar que los resultados de las simulaciones que se presentaron en el capítulo cuatro se combinaron para dar una mayor certeza a los resultados. Sin embargo, en el primer modelo fue evidente el nivel de error que un mallado no adecuado puede acarrear. La mejora del modelo mediante su optimización ha sido significativa en términos de capacidad de computo; gracias a la adecuación de las dimensiones geométricas de las partes involucradas durante el ensayo fue posible implementar una malla densa que permitió tener resultados satisfactorios sin sacrificar tiempo de computo.

5.4 Indentación instrumentada

La indentación instrumentada es sin duda una herramienta sumamente poderosa que permite la obtención de una gran variedad de propiedades mecánicas. En el caso de la obtención directa de dureza se ha podido comprobar que esta propiedad en la tribocapa es mayor que en el material base, resultado esperado debido al endurecimiento por trabajo en frío que se generó a partir de la deformación plástica durante el ensayo tribológico. También se ha podido constatar que para mayores tiempos de ensayo, el material presenta una dureza ligeramente superior. Sin embargo, la diferencia no es tan grande como cuando se compara con el material sin haber sido ensayado, a pesar de la deformación plástica aplicada por el perno. A partir de lo anterior y de los perfiles de rugosidad mostrados en las Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9, donde se aprecia que el valor de la rugosidad en el centro de la huella es muy similar en cada una de las probetas, se puede asumir que al lograr la mezcla mecánica, la dureza del material se mantiene y el parámetro que cambia es el área deformada. Otra situación concerniente a la dureza del material y que vale la pena mencionar, es que se ha observado una diferencia considerable de durezas al comparar con el mismo material tribológico obtenido por medio de colaminado acumulado, Bravo [55] reporta valores de dureza de hasta 1.2 GPa para material cuya deformación equivalente de Von Mises fue de 8.11 y sometida a tratamiento térmico. Esta diferencia en el valor de

dureza obedece a que mediante colaminado acumulado se obtiene una estructura diferente a la de la tribocapa, y aunque esta última se logra a partir de deformación plástica severa y también es un material nanoestructurado, sus características son muy diferentes a las del material base obtenido por colaminado acumulado. Este último punto merece ser estudiado a mayor detalle, ya que la deformación que por medio del perno se aplica al material tribológico puede llegar a ser de hasta 12 y sin un posterior tratamiento térmico lo cual implicaría una mayor dureza.

El comportamiento de la aleación SAE 783 en lo concerniente a la dureza permite señalar que el material cumple cabalmente con otra característica deseada en los cojinetes de deslizamiento; la dureza, ya que la forma mediante la cual se obtiene el material a utilizar en los cojinetes de deslizamiento fabricados en serie es por medio del colaminado, seguido de recocido. Vale la pena mencionar que el valor de dureza y demás propiedades que es posible obtener de la indentación instrumentada se basan completamente en el cálculo que el sistema realiza a partir de la profundidad que el indentador alcanza en el material, lo anterior partiendo de la Ley de Kick; $P = Ch^n$, donde para el caso de la geometría del indentador que se ha utilizado en la presente investigación el valor de n es 2, por lo que los valores de dureza obtenidos se refieren a un cociente de carga entre área utilizando una convención para indentación instrumentada con indentador Vickers.

5.5 Microestructuras

En la observación de superficies se puede apreciar que para cada uno de los materiales utilizados se tiene un comportamiento diferente y característico. El material de aleación SAE 783 sin tratamiento térmico muestra una superficie severamente dañada producto de un fuerte desgaste adhesivo, lo cual provocó la formación de grandes hojuelas y la acumulación de material en una zona específica de la superficie, este proceso se vio claramente reflejado en el ensayo tribológico donde la inestabilidad provocada por la excesiva deformación plástica y autotransferencia de material a una zona específica de la probeta derivó en la finalización prematura de la prueba, haciendo evidente que el material sin tratamiento térmico no cumplió con la característica de compatibilidad tribológica que sin duda es una de las más importantes en los cojinetes de deslizamiento.

La superficie del material con tratamiento térmico también muestra rasgos de desgaste adhesivo. Sin embargo, éste se presenta en mucha menor medida que en el caso del material sin recocer, además de que gracias a la ductilidad obtenida a partir del tratamiento térmico fue posible completar el tiempo de ensayo para cada una de las probetas sin que se tuvieran periodos de inestabilidad estructural en el sistema, lo cual es sin duda signo de la compatibilidad tribológica que el tratamiento térmico proporciona al material. Las zonas ricas en estaño dentro de la tribocapa sugieren la activación de procesos

difusivos y la falta de contacto en algunas zonas dentro de la misma tribocapa. El agrietamiento superficial producido por la microindentación es producto de la severa deformación plástica que se aplicó resultando en la mezcla mecánica cuyas propiedades son óptimas para cojinetes de deslizamiento, incluyendo la dureza; la cual como ya se ha mencionado, se incrementa después del proceso tribológico de formación de la mezcla.

La observación de los perfiles se caracteriza porque en todas las probetas se han observado tres zonas; la primera y más cercana a la superficie es la zona de tribocapa, donde en general se puede apreciar material mezclado mecánicamente y zonas ricas en estaño, el cual ya sea porque ha salido de la mezcla mediante procesos difusivos o porque no ha llegado a mezclarse en ningún momento no forma parte de la tribocapa característica del material. Tarasov [69] ha propuesto que esta zona presenta dos patrones de flujo bien definidos, en la zona más cercana a la superficie se tiene un patrón de flujo laminar, mientras que debajo de la misma se observa una zona inestable que adopta un patrón de flujos rotatorios. Esto es difícil de apreciar en la aleación que en el presente trabajo ha sido sometida a estudio ya que la tribocapa es una zona nanoestructurada, específicamente para la aleación SAE 783 sometida a estudio en el presente trabajo, ha sido posible sólo la observación de la zona que se asemeja a un flujo rotatorio producto de la mezcla mecánica y que es común en la superficie de materiales sometidos a fricción.

La segunda es una zona de deformación plástica donde el material base ha adoptado un patrón de flujo impuesto por el perno. Esta zona se caracteriza por listones alargados de estaño similares a los que se encuentran en un material laminado y que envuelven el perímetro de la tribocapa. En algunos casos, cuando se presenta desprendimiento de la tribocapa, el material deformado plásticamente llega a la superficie, esto es posible confirmarlo en las Figuras 4.44, 4.48 y 4.29.

Finalmente; la tercera zona y más alejada de la superficie se tiene material base; el cual se caracteriza por ser una matriz de aluminio con porciones de estaño recristalizado producto del tratamiento térmico. Es importante mencionar la gran cantidad de intermetálicos que en la aleación SAE 783 se tienen presentes y que generan cambios en las propiedades mecánicas.

Un comportamiento que se presenta como producto de los listones de estaño acumulados en la zona de deformación plástica es la delaminación del material y la propagación de grietas hacia la tribocapa. El desprendimiento de material y su posterior incrustación en una zona diferente hace evidente que este material presenta una incrustabilidad óptima, lo cual es deseable en cojinetes de deslizamiento, ya que en muchas ocasiones, principalmente en motores reconstruidos, se tienen partículas ajenas que pueden provocar daños severos o incluso catastróficos en el motor.

Un logro técnico interesante en el presente trabajo ha sido la observación del perfil de huellas de microindentación tanto dentro como fuera de la tribocapa (Figura 5.3).

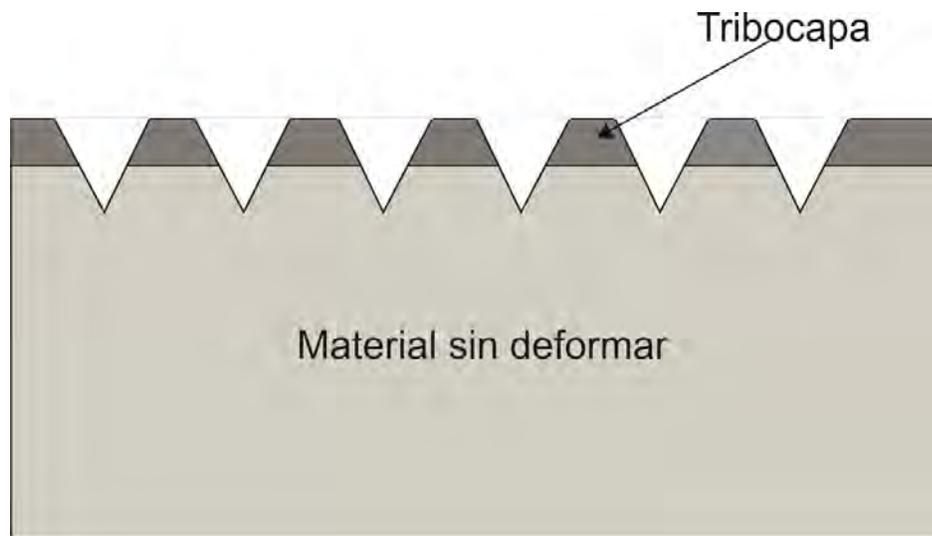


Figura 5.3 Perfil de microindentaciones.

Gracias a la observación de las huellas de microindentación se ha podido comprobar que la tribocapa es lo suficientemente dura y dúctil como para no permitir que el indentador, a pesar de aplicar una carga de magnitud considerable, atraviese la zona de mezcla mecánica, al contrario; el material ha fluido. Por un lado lo anterior es algo que ha ayudado a la caracterización de la tribocapa, ya que no se ha llegado al material base o a la zona de mezcla mecánica. Sin embargo, la obtención de las propiedades mecánicas por debajo de la tribocapa es un tema sumamente interesante y sin duda digno de ser estudiado.

A partir de lo mencionado a lo largo del presente capítulo se ha podido constatar que la aleación SAE 783 sometida al proceso termomecánico llevado a cabo en el presente trabajo es un material que satisface varias de las características que se buscan en un material funcional de cojinetes de deslizamiento.

Capítulo 6. Conclusiones

Se ha logrado la generación de tribocapas uniformes a partir de mezcla mecánica tal como se planteó en los objetivos de la presente investigación. El material base cumple con los requerimientos que en cuestión de propiedades mecánicas se requieren para cojinetes de deslizamiento de uso automotriz. Mediante indentación instrumentada se ha podido caracterizar mecánicamente a las tribocapas generadas. El modelado y simulación del comportamiento bajo condiciones de desgaste de este tipo de material es de gran importancia ya que sirve como guía para el planteamiento de experimentos. Por lo anterior es necesario que se intensifique el estudio de los datos que es posible obtener a partir de la Indentación instrumentada, principalmente en lo referente a tiempos de relajación durante el periodo en que se mantiene una carga constante, ya que a partir de los parámetros que el equipo proporciona es posible obtener las constantes que se necesitan para el modelado de materiales con un comportamiento de fluencia lenta.

La caracterización metalográfica del material ha mostrado que el espesor de las tribocapas es independiente del tiempo de ensayo y el único parámetro que se ve afectado por este factor es el diámetro de las huellas. En general la aleación SAE783 ya sea con tratamiento térmico o sin él muestra en su comportamiento tribológico signos evidentes de desgaste adhesivo.

La formación de tribocapas es un proceso que no requiere de un gran tiempo de ensayo: con un ensayo de sólo 30 segundos se ha podido lograr la mezcla mecánica requerida.

Es sin duda necesario el rediseño del tribómetro coaxial ya que, aunque el prototipo que se ha venido utilizando cumple con sus objetivos iniciales, hace falta un modo de control y medición más preciso con el cual se logrará la obtención de parámetros de gran importancia en tribología, tal como el coeficiente de fricción, o la caracterización del comportamiento tribológico del material lubricado.

La caracterización tribológica de otras aleaciones dúctiles actualmente utilizadas en la industria automotriz, tal como la SAE788 y las aleaciones Babbitt es una tarea que debe llevarse a cabo en un futuro cercano ya que de esta manera se logrará contar con una base de datos amplia.

Bibliografía

1. Pulkrabek, W. (1997). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Wisconsin: Prentice Hall.
2. Priest, M. y Taylor, C.M. (1998). Automobile engine tribology- design considerations for efficiency and durability. *Wear*, 221: 1-8.
3. 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.
4. Stachowiak, G. y Batchelor, A. (2005). *Engineering tribology*. 3rd ed. Sidney: Elsevier Butterworth Heinemann.
5. Ludema, K. C. (1996). *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. Florida: CRC Press LLC.
6. Stolarsky, T. A. (1990). *Mechanical engineering tribology in machine design*. London: Butterworth Heinemann.
7. Spikes, H. (2001). Tribology research in the twenty-first century. *Wear*, 34: 789-799.
8. Bhushan, B. (2008). *Nanotribology and nanomechanics an introduction*. 2nd ed. Berlin: Springer.
9. Neale, M. (2001). *The tribology handbook*. 2nd ed. Oxford: Butterworth Heinemann.
10. Ludema, K. C. (2001). Modern tribology handbook. Volume One: *Friction*.
11. Gnecco, E. y Meyer E. (2007). *Fundamentals of friction and wear on the nanoscale*. Berna: Springer.

12. Czichos, H. (1978). *Tribology: a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear*. Amsterdam: Elsevier.
13. Bowden, F.P. y Tabor, D. (2001). *The friction and lubrication of solids*. Cambridge: Oxford University Press.
14. Krim, J. (2002). Surface science and the atomic-scale origins of friction: what once was old is new again. *Surface Science*, 500: 741- 758.
15. Larsen, J. (2004). ASTM metals handbook. Volume 18: *Introduction to friction*.
16. Cheng, H. (2004). ASTM metals handbook. Volume 18: *Introduction to lubrication*.
17. Williams, J.A. y Dwyer-Joice, R.S. (2001). Modern tribology handbook. Volume One: *Contact between solid surfaces*.
18. Kato, K. y Adachi, K. (2001). Modern tribology handbook. Volume One: *Wear mechanisms*
19. Ludema, K. (2004). ASTM metals handbook. Volume 18: *Introduction to wear*.
20. Axén, N., Hogmark, S. y Jacobson S. (2001). *Modern tribology handbook*. Volume Two: *Friction and wear measurement techniques*.
21. Ruff, A. (2004). ASTM metals handbook. Volume 18: *Wear measurement*
22. Kingsbury, G. and Wandervell, G. (2004). ASTM metals handbook. Volume 18: *Friction and Wear of Sliding Bearing Materials*.
23. Kurmi, R.S. y Gupta, J.K. (2005). *A textbook of machine design*. Nueva Delhi: Eurasia Publishing House.
24. Priest, M. y Taylor, C.M. (1998). *Automobile engine tribology-approaching the surface*. *Wear*, 241: 193-203.
25. Faires, V. M. (1992). *Diseño de elementos de máquinas*. 4ª. ed. México: Limusa: Noriega.
26. Karakaya, I. y Thompson, W. (1988). ASTM Metals Handbook. Volume 3: *Pb (Lead) Binary Alloy Phase Diagrams*.

27. Figueroa Alcántara, C. G. (2009). *Optimización del tratamiento térmico aplicado a la aleación SAE*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
28. Shakhvorostov, D., Pöhlmann, K. y Scherge, M. (2005). Structure and mechanical properties of tribologically induced nanolayers. *Wear*, 260: 433-437.
29. Panin, V., Kolubaev, A., Tarasov, S. y Popov, V. (2002). Subsurface layer formation during sliding friction. *Wear*, 249: 860-867.
30. Rigney, D. (2000). Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials. *Wear*, 245: 1-9.
31. Schouwenaars, R., Jacobo, V.H. y Ortiz, A. (2007). Microstructural aspects of wear in soft tribological alloys. *Wear*, 263: 727 – 735.
32. Schouwenaars, R., Jacobo, V., Cerrud, S. y Ortiz, A. (2005). Tribolayer formation as a functionally self-grading process in soft anti-friction alloys. *Materials Science Forum*, 492-493: 531-538.
33. Dieter, G.E. (1988). *Mechanical metallurgy*. New York: McGraw–Hill.
34. Revankar, G. (2004). ASTM metals handbook. Volume 8: *Introduction to Hardness Testing*.
35. Vander Voort, G.(2004). ASTM metals handbook. Volume 8: *Microindentation Hardness Testing*.
36. Meyers, M. y Chawla, K. (1984). *Mechanical metallurgy principles and applications*. New Jersey: Prentice Hall.
37. Tho, K. Swaddiwudhipong, S. Liu, Z. and Zeng, K. (2005). Simulation of instrumented indentation and material characterization. *Materials Science and Engineering*, 309: 202-209.
38. VanLandingham, M. (2003). Review of instrumented indentation. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 108: 249- 265.
39. Giannakopoulos, A. Y Suresh, S. (1999). Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation. *Scripta Materialia*, 40: 1191-1198.

40. Dao, M., Chollacoop, N., Van Vliet, K.J., Venkatesh, T.A., y Suresh, S. (2001). Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation. *Acta Materialia*, 49: 3899-3918.
41. Dally, J. W. (1991). *Experimental Stress Analysis*. 3a. ed. Singapore: McGraw-Hill.
42. Andresen Eguiluz, R. C. (2010). *Análisis de la tribocapa de 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.
43. Tovolski, E. (2004). ASTM Metals Handbook. Volume 8: *Macroindentation Hardness Testing*
44. *ASTM E10-00 Standard test methods for Brinell Hardness of Metallic Materials [Metric]* (2002). West Conshohocken, PA: ASTM International.
45. Rao, S. (2004). *The finite element method in engineering*. 4rd. Ed. New York: Elsevier.
46. Blau, P. (2004). ASTM Metals Handbook. Volume 18: Appendix: *Static and kinetic friction coefficients for selected materials*.
47. Iniesta Garcia, O. E. y Márquez Sánchez, R. (2007). *Diseño y construcción de un tribómetro coaxial*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
48. Durán Cortés, H. A. (2007). *Superficie de respuesta para el proceso termomecánico de la aleación SAE 783*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
49. *ASTM E8M – 00 Standard test methods of testing metallic materials [Metric]* (2002). West Conshohocken, PA: ASTM International.
50. Dieter, G. E. (1992). ASTM metals handbook. Volume 8: *Mechanical behavior under tensile and compressive loads*
51. Goodhew, P. (2004). ASTM metals handbook. Volume 9: Light and Electron Microscopy.
52. Vander Voort, G. (2004). ASTM metals handbook. Volume 9: Light Microscopy.

53. Exner, H., y Weinbrush, S. (2004). ASTM metals handbook. Volume 9: Scanning electron Microscopy.
54. 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.
55. Bravo Benard A. (2008). *Caracterización de una aleación Al–Sn producida por colaminado acumulado*. Tesis, Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales.
56. Schouwenaars, R., Jacobo, V.H. y Ortiz, A. (2008). *Quantitative comparison of the microstructural quality of two classes of commercial soft triboalloys*. *Materials Characterization*, 59: 312–320.
57. Kim, H., Emge, A., Karthikeyan, S., Rigney, D.A. (2005). Effects of tribooxidation on sliding behavior of aluminum. *Wear*, 259: 501 – 505.
58. Schouwenaars, R., Cerrud, S. y Ortiz, A. (2001). A scanning electron microscopy observation of the substructural evolution of aluminum alloys during cold rolling and partial annealing. *Scanning*, 24: 207-215.
59. Ramírez Díaz, E. I. (2004). *Evolución de la microestructura de la aleación SAE 788 durante su fundición y tratamiento térmico*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
60. Torres Castillo, J. A. (2006). *Optimización del proceso termomecánico de la aleación SAE 783 para cojinetes de deslizamiento*. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
61. Glaeser, W. (2001). Modern tribology handbook. Volume One: *Wear Debris Classification*.
62. Hirt, J. y Lothe, J. (1982). *Theory of dislocations*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons.
63. Rivera, P., Reischig, P., Xu, W., y Van der Zwaag, S. (2005). Theory for diffusional transformation kinetics: multicomponent and multiphase systems. *Scripta Materialia*, 53: 1089-1094.

64. Humphreys, F. J., y Hatherly, M. (1995). *Recrystallization and related annealing phenomena*. London: Pergamon.
65. Schouwenaars, R., Cerrud, S. y Ortiz, A. (2001). Recrystallization kinetics in an aluminum-tin alloy for bimetal bearings. *Recrystallization and Grain Growth, Proceedings of the First Joint International Conference*. Springer-Verlag.
66. Basavakumar, K., Mukunda, P.G., Chakraborty, M. (2009). Dry sliding wear behavior of Al – 12Si and Al – 12Si- 3Cu cast alloys. *Materials and Design*, 30: 1258 – 1267.
67. Cahn, W. y Haasen, P. (1996). *Physical Metallurgy*, Vol. 2. 3rd. ed. Elsevier
68. Abaqus Theory Manual. *Rate-dependent metal plasticity (creep)*
69. Tarasov, S. y Rubstov, V. (2011). Shear Instability in the Subsurface Layer of a Material in Friction. *Physics of the Solid State*, 53: 358-362.
70. Riahi, A. y Alphas A. (2001). The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites. *Wear*, 251: 1396-147.
71. Akarca, S., Altenhof, W, y Alphas, A. (2007). Subsurface deformation and damage accumulation in aluminum – silicon alloys subjected to sliding contact. *Tribology International*, 40: 735-747.
72. Embury, J., Dechamps, A., Brechet, Y. (2003). The interaction of plasticity and diffusion controlled precipitation reactions. *Scripta Materiala*, 49: 927-932.
73. Goover, M. (2004). *Fundamentals of modern manufacturing*. 2nd. Ed. New York: John Wiley and Sons.
74. Meshi, L., Samuha, S., Cohen, S.R., Laikhtman, A., Moshkovich, A., Perfilyev, V., Lapsker, I. y Rapoport, L. (2011). Dislocation structure and hardness of surface layers under friction of copper in diferent lubricant conditions. *Acta Materialia*, 59: 342-348
75. Kearney, A. y Rooy, E. (1992). Aluminum foundry products. En *ASM Handbook*. Cleveland, Ohio: ASM International.