



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización tribológica de
una aleación Cu 2Mg 2Sn bajo
diferentes condiciones de
tratamiento térmico**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Mecánica

P R E S E N T A

Ileana Maria Garcia Cabeza

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rafael Schouwenaars



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado CARACTERIZACION TRIBOLOGICA DE UNA ALEACION CU 2MG 2SN BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE TRATAMIENTO TERMICO, que presenté para obtener el título de INGENIERO MECÁNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ILEANA MARIA GARCIA CABEZA
Número de cuenta: 114000837

ÍNDICE

Índice.....	2
Objetivo	4
Agradecimientos	5
Resumen.....	6
Abstract	7
1. Introducción	8
1.1. Tribología	8
Interacción de cuerpos sólidos	8
Definición.....	8
Fricción, desgaste, lubricación	8
1.2 Materiales tribológicos	9
Definición de un material tribológico	9
Definición de tribopar	9
Compatibilidad tribológica y el desgaste	9
1.3 Tribología: Impacto económico y ambiental.....	10
Impacto en PNB (Producto Nacional Bruto)	10
Uso razonable de recursos y reducción de emisiones.	11
1.4 Tribología automotriz	11
Cojinetes.....	11
Aleaciones en cojinetes	12
2. Antecedentes	13
2.1 Historia del proyecto.....	13
2.2 Superficies y Rugosidad	13
Superficies	13
Rugosidad	14
2.3 Fricción	16
Definición.....	16
Historia	16
Tipo de fricción (deslizamiento, rodamiento, combinado).	17
2.4 Desgaste	18
Desgaste	18
2.5 Factores que alteran la respuesta al desgaste	21
Ley de Archard.....	21
Endurecimiento (procesos en frío).....	22
3. Procedimiento Experimental	23

3.1 Fundición	23
3.2 Laminado	23
3.3 Ensayo de Tracción.....	24
Probetas de ensayo de tracción	24
Tratamiento térmico. Probetas de Tracción	25
Ensayos de tracción.....	25
Resultados ensayo de tracción	26
3.4 Muestras metalográficas	27
3.5 Ensayos Tribológicos	27
Ensayos de desgaste	27
Ensayos de fricción.....	29
Ensayos de microdureza	30
Perfilometría óptica	30
4. Resultados	33
4.1 Microestructura.....	33
Dureza	34
4.2 Fricción.....	35
4.3 Desgaste.....	39
Perfilometría óptica	39
Microscopía electrónica de barrido	43
5. Discusión	46
5.1 Diagrama de fases	46
5.2 Tracción	47
5.3 Fricción.....	48
5.4 Desgaste.....	48
6. Conclusiones.....	50
7. Referencias	51

Objetivo

Estudiar el efecto de la microestructura, resistencia mecánica y ductilidad en el desempeño de una nueva aleación tribológica bajo condiciones de desgaste y fricción deslizante

Agradecimientos

Al Dr. Rafael Schouwenaars, por la paciencia que ha tenido en cada etapa del proyecto, por todo el tiempo dedicado a explicarme con claridad y disposición.

Al Dr. Carlos Gabriel Figueroa Alcántara, por su guía en la parte experimental, por enseñar con paciencia y vocación.

A los miembros del jurado, el Dr. Armando Ortiz Prado, el Dr. Ignacio Alejandro Figueroa Vargas y al Dr. Leopoldo Ruiz Huerta, por su tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y sus valiosos comentarios.

Al Dr. Flores Alarcón Jorge Luis, por compartir su conocimiento con generosidad, por guiar con amabilidad.

Al Ing. Machuca Flores Aarón Israel, por el apoyo constante, por el compañerismo en un ambiente de confianza y aprendizaje.

A mi madre Graciela, gracias por procurar siempre que nunca me faltara nada, por apoyarme en mis sueños aunque esos me llevaran lejos de casa. Gracias por criarme para jamás perder la curiosidad por un mundo tan maravilloso.

A mi abuelo Manuel, gracias por enseñarme amar la escuela, por siempre hacerme sentir importante.

A mis hermanos Alonso y Bruno, gracias por impulsarme a ser mejor persona, por sus risas cómplices después de cada travesura.

A Gabriela y Miguel Pulido Cervantes, gracias por adoptarme en su familia con amor desde el primer día, gracias por recibirme con ternura y darme la oportunidad de llevar con orgullo sus enseñanzas.

A Miguel, gracias por tantos años de amistad, por crecer a mi lado, por cada aventura compartida, por ser mi confidente, amigo y testigo silencioso, por enseñarme que siempre se puede encontrar un motivo para reír.

A Marcos, gracias por tu compañía constante y serena, por ser el ejemplo de lo que aspiro a ser, por ser la luz en medio del mar, gracias por enseñarme a vivir con esperanza y amor.

Al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación [PAPIME] por la beca de Tesis de licenciatura otorgada a través del proyecto "Metodología para la implementación de actividades experimentales fundamentadas en termodinámica computacional en asignaturas del Área de Materiales en La Facultad de ingeniería" con clave PE104225 a cargo del Dr. Carlos Gabriel Figueroa Alcántara

Al Programade Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica [PAPIIT] por los materiales proporcionados para realizar la aleación y las pruebas tribológicas a través del proyecto con clave IV100125, a cargo del Dr. Rafael Schouwenaars

Gracias a mis maestros en la Preparatoria 2 que durante mi formación académica despertaron e incentivaron mi pasión por las ciencias y la investigación, por la escritura y por la ciencia aplicada a causas sociales.

Y finalmente, a la Universidad Nacional Autónoma de México que ha sido la responsable de mi formación los últimos 12 años, a quien le debo todo el conocimiento.

Resumen

El desgaste acorta la vida útil de las piezas, mientras la fricción incrementa el consumo de energía, esta situación ha impulsado el desarrollo de aleaciones tribológicas con el objetivo de reducir las pérdidas energéticas, económicas y el impacto ambiental. En este trabajo se estudia el comportamiento de la aleación Cu-2%Mg-2%Sn (peso) frente a la fricción y el desgaste, asociando los resultados con la microestructura y propiedades mecánicas como la dureza y la ductilidad.

El análisis microestructural, obtenido mediante EBSD, resalta las diferencias dependiendo de los tratamientos térmicos (recocido) recibidos por el material. A 400 °C se observa un estado de recuperación, a 500 °C se inicia la recristalización y a 600 °C se identifica crecimiento de grano posterior a la recristalización. También se observa el papel de las partículas intermetálicas en la evolución de la microestructura, desde el material laminado en frío con bandas intermetálicas hasta el material recocido a 600 °C con los intermetálicos disueltos.

Los ensayos de tracción muestran una relación directa entre las características microestructurales y la respuesta mecánica. Tanto el esfuerzo máximo como la tenacidad estuvieron condicionados por variables como el tamaño de grano y el endurecimiento en cada condición de tratamiento. La muestra laminada en frío muestra una mínima ductilidad, mientras las muestras recocidas presentan un comportamiento dúctil.

Los ensayos de fricción, realizados en configuración de fricción recíproca, revelaron que, salvo en condiciones muy específicas, la mayoría de las curvas presentan una fase de transición (rodaje) durante la cual el coeficiente de fricción experimenta una disminución progresiva hasta alcanzar la estabilidad. En la mayoría de las condiciones evaluadas, el coeficiente de fricción converge a un valor promedio relativamente estable, tanto en la ida como en la vuelta del recorrido.

En cuanto a los ensayos de desgaste, la perfilometría óptica junto con los perfiles de profundidad permite identificar el material con menor desgaste involucrado sin la necesidad de cuantificar directamente la pérdida volumétrica. Las huellas de desgaste en los tratamientos térmicos de 500° y 600°, presentan la formación de crestas en los bordes de las huellas, lo que indica que el flujo plástico domina la respuesta.

Los análisis microscópicos, incluidos los realizados mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), confirman que el desgaste es ligeramente adhesivo en las 16 muestras, mientras el régimen es de desgaste ligero. Adicionalmente, se encontró información relativa a los micromecanismos involucrados.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que para la aleación Cu₂Mg₂Sn (peso) el recocido a 500° mejora el comportamiento ante el desgaste. Además, el material bajo este tratamiento térmico representa una combinación óptima entre tenacidad, dureza intermedia y bajo coeficiente de fricción.

Abstract

Wear shortens the lifespan of components, while friction increases energy consumption. This situation has encouraged the development of tribological alloys with the aim of reducing economic losses and environmental impact. In this work, the behavior of Cu 2Mg 2Sn (wt) alloy subject to friction and wear is studied, associating the results with the microstructure and mechanical properties such as hardness and ductility.

The microstructural analysis obtained by EBSD, reveals differences depending on the heat treatments (annealing) received by the material. At 400 °C a state of recovery is observed, at 500 °C recrystallization occurs and at 600 °C grain growth is identified after recrystallization. The role of intermetallic particles in the evolution of the microstructure is also observed, from the cold rolled material with intermetallic bands to the material annealed at 600 °C with dissolved intermetallics.

Tensile tests show a direct relationship between microstructural characteristics and mechanical response. Both the maximum stress and toughness were conditioned by grain size and hardening at each treatment condition. The cold rolled sample shows minimal ductility, while the annealed samples are ductile.

The friction tests, performed in a reciprocating friction configuration, revealed that, except in very specific conditions, most of the curves have a transition phase (running-in) during which the friction coefficient decreases progressively until stability is reached. In most of the conditions evaluated, the coefficient of friction converges to a relatively stable average value, both on the outward and the return stroke.

As for the wear tests, optical profilometry together with depth profiles allow the identification of the material with the least wear involved without the necessity of quantifying the volumetric loss directly. The wear tracks in the 500° and 600° heat treatments present the formation of crests at the edges of the wear tracks, indicating that plastic flow dominates the behavior of the response.

Microscopic analyses, including those performed by scanning electron microscopy (SEM), confirm that the wear is slightly adhesive in all 16 samples, while the wear regime is light wear. In addition, information was found regarding the micromechanisms involved in this process.

Overall, the results obtained allow to conclude that for the Cu₂Mg₂Sn (wt) alloy, annealing at 500° offers the best wear behavior. Furthermore, the material under this heat treatment represents an optimum combination of toughness, intermediate hardness and low coefficient of friction.

1. Introducción

1.1. Tribología

Interacción de cuerpos sólidos

El comportamiento de cuerpos sólidos en contacto es un tópico central en la ingeniería mecánica. Al estar en contacto, los sólidos experimentan interacciones en su superficie. Sin embargo, el estudio sistemático alrededor de los fenómenos que ocurren en la interacción de superficies no adquirió su debida importancia sino hasta el siglo XX, con el surgimiento de la disciplina de la tribología. [1]

Definición

La denominación tribología se introdujo en 1965 y deriva del griego: 'tribos', que alude al fenómeno de fricción, y 'logos', que significa estudio o tratado; se define como el estudio de los cuerpos en contacto sujetos a un movimiento relativo entre ellos. Investiga fenómenos mecánicos de interacción entre superficies como la fricción, el desgaste, la lubricación y el campo de esfuerzos y temperaturas, abarcando áreas correspondientes a la ciencia y tecnología de materiales, la mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, la termodinámica y la mecánica clásica.[1-3]

Fricción, desgaste, lubricación

La fricción se define como la resistencia al movimiento relativo de dos cuerpos en contacto. Este fenómeno resulta de las fuerzas tangenciales transmitidas a través de la superficie de contacto cuando los sólidos se presionan entre sí mediante una fuerza normal. De acuerdo al contexto de la aplicación tecnológica, en alguna se requiere reducir o bien incrementar la fricción entre los componentes involucrados. [1]

En el contexto del presente trabajo, el desgaste se define como el deterioro de material en una superficie como resultado de su interacción con el otro cuerpo en contacto. Aunque se puede definir como la remoción de material, otros autores prefieren una definición más amplia al definir el desgaste como el daño a una superficie sólida, que generalmente implica la pérdida progresiva de material, debido al movimiento relativo entre dicha superficie en contacto con un sólido, líquido o gas. [1-2]

Aunque la lubricación no forma parte de este trabajo, desempeña un papel relevante en el desarrollo de la interacción entre superficies en movimiento relativo. Su objetivo principal es reducir la fricción, disminuir la remoción de material o controlar la temperatura. De manera general, existen dos clasificaciones: la lubricación por fluidos ocurre cuando una capa de fluido separa las superficies sólidas en contacto, mientras que la lubricación con película sólida ocurre cuando una capa sólida se interpone entre las superficies deslizantes. [1]

En conclusión, la tribología busca comprender los fenómenos que ocurren en la interacción entre materiales bajo movimiento relativo, mientras la fricción, el desgaste y la lubricación conllevan un papel fundamental en el desarrollo de dichas interacciones. El comportamiento y entendimiento de los materiales que componen los cuerpos en contacto sujetos a un movimiento relativo entre ellos será abordado en la siguiente sección.

1.2 Materiales tribológicos

Definición de un material tribológico

Un material tribológico se define como aquel diseñado para modificar la fricción y el desgaste en aplicaciones con contacto entre superficies. Las propiedades específicas de estos materiales dependen de los elementos que los componen; el diseño de materiales tribológicos requiere considerar tanto el desempeño en operación como la interacción mecánica, física y química con los otros materiales en contacto. En el contexto de esta tesis, se estudian solamente las aleaciones tribológicas. Sin embargo, las mismas consideraciones se extienden a cerámicas, polímeros y compuestos tribológicos.

La designación de un material como tribológico se encuentra absolutamente ligada a su aplicación. En función de las necesidades específicas de la aplicación, estas aleaciones deben poseer propiedades y características clave, las cuales pueden incluir una elevada resistencia mecánica, conformabilidad, alta tenacidad, incrustabilidad, resistencia a la fatiga, alta conductividad térmica, bajo coeficiente de expansión térmica, resistencia a la corrosión, baja toxicidad, alto punto de fusión, u otras características impuestas por el diseño y la operación de un sistema específico.

Definición de tribopar

El término de tribopar hace referencia a aquel par de materiales que, teniendo un contacto entre sus superficies, están diseñados para modificar la fricción y el desgaste durante su operación conjunta. Cabe señalar que el término tribopar es una traducción y adaptación del término *tribocouple*, empleado en diversas publicaciones por autores como Rigney [4,5], Kapoor [6] y Rainforth [7]. Sin embargo, el concepto puede variar o modificarse ligeramente de acuerdo al contexto, entre estas diferencias se encuentra si el concepto incluye las condiciones de operación [6] o si el par de materiales es o no diseñado específicamente para las condiciones de contacto.[7]

Compatibilidad tribológica y el desgaste

Es conveniente destacar que la fricción y el desgaste no son propiedades intrínsecas de los materiales, sino que dependen de parámetros experimentales y de las condiciones específicas de uso; por tanto, es incorrecto hablar de una resistencia al desgaste inherente del material. El nivel de desgaste que presentan dos cuerpos en contacto sujetos a un movimiento relativo entre ellos depende en gran medida de la compatibilidad tribológica entre los materiales de los cuales están conformados dichos cuerpos, de la cinemática y de la geometría de las superficies. [8]

En cuanto a la compatibilidad tribológica, Rabinowicz [1] propuso que esta compatibilidad, durante el contacto deslizante entre un par de materiales, está estrechamente relacionada con la solubilidad mutua. Según la tabla de Rabinowicz, una mayor solubilidad líquida y sólida entre los materiales tiende a reducir la compatibilidad tribológica, mientras que una menor solubilidad en estado líquido la incrementa. En términos de la termodinámica metalúrgica, esto se puede relacionar de manera más precisa con la energía de enlace entre los elementos involucrados. De tal manera, materiales que son químicamente compatibles serán tribológicamente incompatibles. El

concepto de compatibilidad se puede extender a tribopares metal-cerámica y cerámica-cerámica también. [9,10]

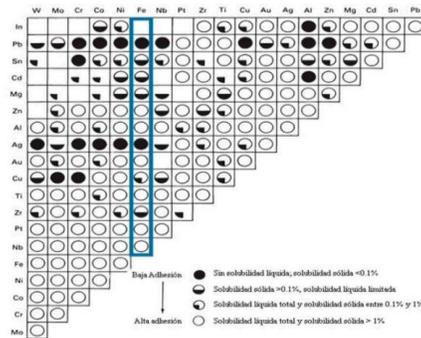


Figura 1. Esquema que indica la relación entre compatibilidad Tribológica y compatibilidad metalúrgica [1]

1.3 Tribología: Impacto económico y ambiental

Aunque se definieron la fricción, el desgaste y los materiales tribológicos, su impacto económico merece un apartado propio. Comprender las interacciones superficiales es esencial para optimizar los materiales y con ello reducir las implicaciones económicas asociadas al desgaste, las cuales incluyen costes directos relacionados con la fricción y el desgaste, así como costes indirectos como pérdidas de producción o gastos de mantenimiento correctivo.

Las cifras globales son contundentes, pues se estima que entre el 30% y el 50% de la energía generada se pierde debido a la fricción en las máquinas y aproximadamente el 55% de las fallas en piezas mecánicas se atribuyen a efectos de desgaste. Además, se ha estimado que el 25% de las pérdidas anuales por fricción y desgaste podrían evitarse mediante la implementación de soluciones derivadas de la investigación. [11,12]

Impacto en PNB (Producto Nacional Bruto)

Las pérdidas debido a los fenómenos asociados al deterioro mecánico de la superficie son una proporción significativa del producto nacional bruto (PNB) en países industrializados. En 1960 se estimó que el desperdicio de recursos en Reino Unido alcanzaba los 515 millones de libras esterlinas anuales, una cifra que posteriormente se reconoció como subestimada. En 1976, Rabinowicz calculó que en Estados Unidos las pérdidas anuales a consecuencia de la fricción y el desgaste sumaban 10.000 millones y 100.000 millones de dólares, en donde un dólar de 1976 es equivalente al poder adquisitivo de unos 5.62 dólares actuales. [1,13]

De forma similar, el informe de la Comisión Nacional de Política de Materiales al Congreso estadounidense en 1974 destacó que las pérdidas tribológicas representaban un costo a la economía del país de 100 mil millones de dólares al año, de los cuales 20 mil millones corresponden exclusivamente a materiales. Estimaciones posteriores corroboraron esta tendencia. [1, 3]

El informe Jost realizado en 1966 afirmaba que el ahorro tras diez años de aplicación a gran escala del desarrollo tecnológico de la tribología en la industria británica podría

alcanzar los 515 millones de libras esterlinas al año. El ahorro estimado en 1966 era del 1,36% del PNB, mientras en la actualidad, se cree que una atención adecuada a la tribología podría suponer un ahorro económico de entre el 1.3 y el 1.6% del producto nacional bruto (PNB). [3,14]

En cifras más recientes, en 2017 se estimó que las pérdidas de energía debidas a la fricción y el desgaste podrían reducirse en un 40% en 15 años y en un 18% en 8 años. A escala mundial, este ahorro equivaldría al 1.4% del PIB anual y al 8.7% del consumo total de energía a largo plazo. [15]

Uso razonable de recursos y reducción de emisiones.

No sólo se debe de considerar la importancia del impacto económico, la tribología tiene aplicaciones ambientales relevantes, el desgaste acorta la vida útil de las piezas, mientras la fricción incrementa el consumo de energía y contribuye a la escasez de materiales y recursos energéticos. Se prevé que en los próximos años los sectores con los mayores ahorros de energía serán el sector transporte y en el de generación de electricidad. Respecto a los contaminantes, en 2017 se esperaba que la aplicación de la tribología lograra reducir las emisiones de CO₂ a nivel mundial hasta en 1 460 MtCO₂, además de alcanzar un ahorro de costes de 450 000 millones de euros a corto plazo (8 años). [11, 15]

Algunos ejemplos de dicha reducción se presentan a continuación, en el sector eólico la mejora tribológica de los cojinetes de turbogeneradores de 500 MW permitió reducir las pérdidas por fricción en aproximadamente 1 MW. De manera similar, en un ejemplo de la industria azucarera, la sustitución del material en las chumaceras de los molinos de los centrales azucareros redujo el coeficiente de fricción de 0.08 a 0.068, lo que resultó en ahorro energético de 52 MW-h/Molino-zafra. [3,11,16, 17]

1.4 Tribología automotriz

En la industria automovilística, el desgaste en componentes en contacto y movimiento como cilindros, cojinetes y anillos del pistón representa pérdidas asociadas que equivalen a entre el 4 y el 10% del producto interno bruto de los países. Una porción nada despreciable de la energía generada por el motor se pierde debido a la fricción en elementos como el conjunto pistón-cilindro y los cojinetes del eje de válvulas. Este fenómeno no sólo es relevante económicamente, sino que también contribuye a mayores emisiones contaminantes. [11, 18- 20]

Desde la segunda mitad del siglo XX, el desarrollo en la industria automotriz ha priorizado la mejora de la eficiencia energética y la reducción de emisiones. Estos avances han derivado en motores cada vez más eficientes en el consumo de combustible, más compactos y con mayor potencia específica, diseñados para operar a velocidades y temperaturas elevadas. Sin embargo, estas mismas condiciones han aumentado la necesidad de implementar materiales tribológicos, aplicar revestimientos superficiales o aplicar técnicas de ingeniería superficial. [21]

Cojinetes

Los cojinetes se definen como elementos de máquinas que permiten de manera simultánea girar libremente un eje y soportar carga. Son puntos de apoyo de ejes y

árboles para soportar la carga y transmitirla a la bancada así como guiarlos en sus movimientos reduciendo las pérdidas de energía por fricción y el desgaste entre las superficies en contacto con ese movimiento relativo. Existen diferentes tipos de cojinetes, se pueden clasificar en cojinetes antifricción (rodantes), cojinetes deslizamiento, o bien en cojinetes sin lubricación, lubricados por aire, lubricados por agua, por lubricantes convencionales, cojinetes planos. [22]

Para los fines de este trabajo, los cojinetes de deslizamiento son elementos de máquina construidos en forma de casquillos o bujes que tienen un movimiento en contacto directo, realizándose un deslizamiento con fricción. La reducción del rozamiento se consigue con la adecuada selección de materiales (diferentes al material del árbol o eje) y lubricantes. [22]

En los cojinetes de deslizamiento con lubricación hidrodinámica, el principio de operación se basa en la generación de una película lubricante entre los componentes en movimiento. Esta capa funciona separa las superficies sólidas, evitando el contacto directo entre los metales y previniendo daños provocados por partículas abrasivas. Sin embargo, durante el arranque del motor o cambios súbitos de régimen de operación, un contacto limitado entre sólidos (eje y cojinete) es inevitable y los materiales utilizados tienen que soportar estas condiciones con un desgaste mínimo. [3]

Por lo anterior, se evidencia que el material utilizado en la fabricación de cojinetes debe tener alta resistencia mecánica a la compresión, para evitar deformaciones plásticas o fracturas, además de resistencia a la fatiga, para soportar cargas cíclicas. El material del cojinete debe tener una alta conductividad térmica y un bajo coeficiente de expansión térmica. [23]

Aleaciones en cojinetes

En los motores de combustión interna existen tres tipos de cojinetes, los cuales resultan interesantes de mencionar: los Babbitts, producidos con aleaciones basadas en plomo-estaño-antimonio, los cojinetes trimetálicos, que emplean aleaciones cobre-plomo-estaño y un recubrimiento babbitt y los cojinetes bimetálicos que utilizan aleaciones de aluminio-estaño. Los cojinetes trimetálicos son utilizados para condiciones de trabajo severas, mientras los bimetálicos se utilizan en aplicaciones menos exigentes, como motores compactos. [24, 25]

Durante los últimos cien años, las aleaciones cobre-plomo han sido utilizadas en cojinetes de deslizamiento para motores de combustión interna y maquinaria pesada. Sin embargo, actualmente se sabe que el plomo es un metal pesado, altamente tóxico; el reconocimiento de la toxicidad del plomo y sus implicaciones tanto al ambiente como en la salud ha impulsado la búsqueda de nuevas alternativas, las cuales incluyen desarrollar aleaciones basadas en cobre que eliminan el uso de elementos tóxicos

En aplicaciones industriales, las aleaciones Cu-Pb se utilizaban principalmente en motores pesados, mientras que las aleaciones Al-Sn se emplean en motores compactos. Sin embargo, para condiciones de operación sujetas a un desgaste severo debido a la fricción se utilizan las aleaciones de cobre, como el bronce o el latón, tal es el caso de trituradoras y molinos utilizados en la industria minera.

2. Antecedentes

2.1 Historia del proyecto

El desarrollo de materiales en motores de combustión interna y maquinaria pesada actualmente tiene como objetivo aumentar la eficiencia energética y reducir las pérdidas tanto económicas como ambientales derivadas de la fricción y el desgaste. Es por ello relevante considerar que dos materiales tribológicamente compatibles, lo que implica que el coeficiente de fricción entre ellos es bajo, pueden deslizarse en contacto sin que sufran desgaste significativo.

La selección de la aleación Cu-Mg-Sn se realizó dada la compatibilidad tribológica que tienen el Mg y Sn con el Fe. De acuerdo con la tabla de compatibilidad tribológica de Rabinowicz, los materiales más adecuados para combinar con el Fe son el Pb, In, Cd, Ag, Zr, Bi, Sn y Mg. Sin embargo, existen diversos factores que imposibilitan o hacen inviable la elección de dichos materiales. El plomo, el indio y el cadmio son materiales tóxicos, mientras la plata y el zirconio presentan costos elevados. El Bi se ha intentado utilizar, sin éxito, lo que no excluye la posibilidad de considerarlo en estudios más avanzados a futuro. Por lo tanto, los elementos seleccionados son el magnesio y el estaño. [26, 27]

El presente trabajo utiliza específicamente la aleación Cu₂Mg₂Sn (peso) , correspondiente a la máxima cantidad de magnesio que puede incorporarse al cobre sin provocar complicaciones en la etapa de laminación, basado en ensayos realizados en el grupo de trabajo. El objetivo del trabajo es evaluar tanto las propiedades mecánicas, como dureza y tenacidad en su desempeño bajo condiciones de desgaste y fricción en deslizamiento no lubricado.

El Cu₂Mg₂Sn (peso) también es una alternativa no solo para aplicaciones automotrices, sino también para componentes de alta exigencia, como las guías eléctricas de trenes de alta velocidad, esto debido a que posee una alta resistencia mecánica, elevada conductividad térmica y eléctrica, y buena resistencia a la corrosión. [28]

2.2 Superficies y Rugosidad

Superficies

La perfección de una estructura cristalina teórica puede describirse mediante formulaciones matemáticas elegantes, en contraste, en la superficie la periodicidad perfecta del cristal termina y las descripciones matemáticas de la física teórica fallan. En la práctica, los cristales considerados perfectos no existen. En la ciencia de materiales, se estudian las imperfecciones cristalinas y las maneras para aprovechar éstas para optimizar las propiedades de los materiales para la ingeniería.

Sólidos que contienen defectos intersticiales, sustitucionales, dislocaciones y límites de grano resultan ser mucho más complejos que las superficies consideradas por Pauli. Cottrell postuló que la deformación plástica y el endurecimiento por trabajo en frío es el problema más complejo sin solución en la física clásica [29].

Tal y como los sólidos reales no son perfectos, sus superficies muestran desviaciones significativas con respecto a las superficies ideales en la superficie de cristales perfectos. Existen estudios avanzados de fricción y desgaste en superficies cuasi perfectas, que utilizan muestras nanométricas en microbalanzas de cuarzo o microscopios de fuerza atómica y operando en alto vacío. [30-32]

En la vida real, una superficie instantáneamente reacciona con el medio ambiente, lo que afecta sus propiedades físicas y químicas. Más importante, cada superficie muestra rugosidad, como se explica en la siguiente sección. Finalmente, la superficie no existe sin el bulto del material, cuyas imperfecciones cristalinas pueden afectar a los efectos superficiales.

Rugosidad

La rugosidad es la variación de la altura de la superficie con respecto a un nivel de referencia. Este nivel puede estar definido como un plano fijo dentro de un sistema de medición o puede ser un ajuste a la geometría teórica de una superficie curva, por ejemplo, en el caso de una esfera rugosa. En este ejemplo, la medición se corrige para reportar la altura de la superficie con respecto con una esfera matemática que presenta la aproximación más cercana a la geometría medida.

La topografía de una superficie se define por la superposición de tres funciones. La primera define la geometría ideal del cuerpo, por ejemplo, la superficie de un engrane, la geometría esférica de un balón o el plano de altura media para una sección metalográfica. La segunda describe la desviación sistemática de la altura con respecto a la función anterior y puede ser periódica o cuasiperiódica. Un ejemplo son las marcas de maquinado en una geometría generada por procesos de corte. En teoría, éstas forman un patrón periódico, pero a nivel industrial, pequeñas desviaciones pueden presentarse en el ancho y profundidad de estas marcas. Los patrones periódicos se pueden modelar mediante la teoría de series de Fourier [33].

El tercer nivel representa la variación aleatoria con respecto a la suma de los dos anteriores. El estudio de esta variación se basa en la teoría de los procesos aleatorios [34-36].

Tanto la parte periódica como la aleatoria presentarán picos cuya altura es mayor del entorno local. Estos picos se conocen como asperezas. Cuando se investiga la superficie a mayores aumentos, se observará que tanto en las zonas bajas como en las zonas elevadas, se encuentran asperezas de menor tamaño y altura. Si este patrón de superposición de asperezas aleatorias a escalas siempre menores se repite hasta el tamaño de los átomos, se habla de una rugosidad aleatoria fractal [34, 36]

El análisis clásico de los parámetros de rugosidad, basados en la línea media se agrupan en tres categorías: aquellos que se basan en la medida de la profundidad de la rugosidad, los que consideran medidas horizontales y aquellos que se fundamentan en medidas proporcionales. [37] Algunos de los parámetros más representativos que basan la media en función de la profundidad son:

- R_a - Rugosidad media aritmética: Media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones de la altura de la superficie desde la línea media
- R_q - Rugosidad media cuadrática: La raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las ordenadas del perfil efectivo en relación a la línea media, es decir, la desviación estándar de la altura.
- R_z - Altura máxima de la rugosidad: Media aritmética de las distancias verticales entre los cinco picos más altos y los cinco valles más bajos dentro de una longitud de evaluación.
- R_t - Profundidad total de la rugosidad: Distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo.
- R_p - Cresta mayor del perfil: Distancia entre el punto más alto del perfil y la línea media.
- R_v - Valle más profundo: Distancia entre el punto más bajo del perfil y la línea media.

Variación a lo largo del tiempo

La rugosidad en sistemas mecánicos no permanece constante, existe un periodo inicial de contacto, conocido como periodo transitorio o de rodaje durante el cual la rugosidad tiende a cambiar. En este periodo, las asperezas de las superficies están sometidas a condiciones mecánicas que promueven su desgaste y deformación, en este periodo las superficies en contacto experimentan una adaptación significativa.

Este fenómeno de adaptación superficial responde a múltiples mecanismos de desgaste predominantes. El conjunto de la deformación plástica, formación y ruptura de uniones adhesivas, y la presencia de partículas sueltas o asperezas afiladas determina la evolución dinámica durante el periodo de rodaje, por lo tanto, la duración del periodo transitorio puede variar desde segundos hasta horas, dependiendo de las condiciones de contacto y del par tribológico. [38, 39]

Área de contacto real y aparente

El contacto es un problema que se ha estudiado de manera amplia en las disciplinas de la mecánica teórica y aplicada. Como se ha descrito anteriormente, todas las superficies son rugosas, de tal manera que el contacto entre superficies ocurre sobre varios puntos o zonas al mismo tiempo. La conclusión es entonces evidente, el área de contacto verdadera es distinta del área de contacto aparente. [33]

Determinar el área de contacto verdadera, se requiere una descripción objetiva y cuantitativa de la rugosidad en superficies de contacto. Existen diferentes estudios propuestos para explicar el contacto de superficies rugosas, entre ellos, métodos numéricos avanzados que simulan la topografía, métodos de elemento finito o métodos de dinámica molecular. [33]

El área real varía de acuerdo con la presión de contacto, como se puede apreciar en la siguiente imagen, elaborada por Flores [24], para la cual el contacto inicial ocurre sobre varias zonas al mismo tiempo y provoca un contacto elástico de manera inicial, conforme aumenta la presión de contacto, aumentan las zonas sobre las cuales existe el contacto entre superficies y también se modifica el contacto elástico a un contacto con deformación plástica. [33]

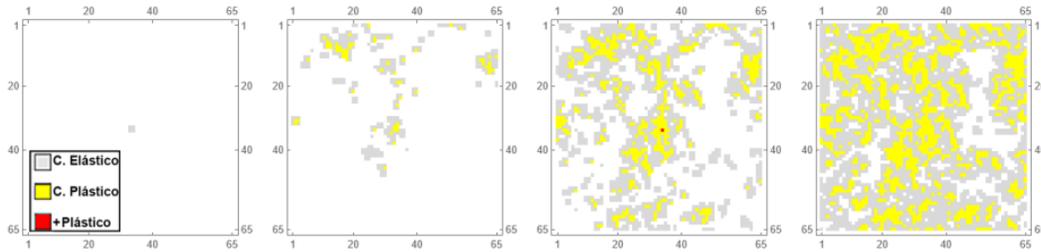


Figura 2. Evolución del área de contacto real conforme aumenta la presión de contacto [33].

Influencia de la rugosidad

La rugosidad está directamente relacionada con los mecanismos de desgaste, superficies con una mayor rugosidad superficial tienden a tener una menor área de contacto real, existen menos puntos de contacto debido a que el contacto se produce principalmente en las puntas de las asperezas. Como consecuencia, la carga aplicada se distribuye sobre un área más pequeña, la presión de contacto local aumenta, lo que puede inducir fluencia plástica si se supera el límite de resistencia del material. En las superficies con mayor rugosidad se favorece el desgaste abrasivo, ya que las asperezas más pronunciadas remueven material de la superficie más blanda durante el movimiento relativo. [40]

2.3 Fricción

Definición

La fricción se define como la resistencia al deslizamiento entre dos superficies en contacto. La fricción es un proceso de disipación de energía que transforma la energía mecánica de los cuerpos deslizantes en calor. Se puede diferenciar entre la fricción dinámica y la fricción estática. La fricción dinámica es la fuerza necesaria para continuar el deslizamiento, no depende de la velocidad y es menor que la fricción estática. La fricción estática es aquella que se opone al inicio del movimiento. [41]

El coeficiente de fricción, por otra parte, representa la facilidad con la que los materiales se deslizan unos sobre otros. El coeficiente de fricción se define de manera general como la relación de dos fuerzas que actúan en perpendicular y en paralelo, respectivamente, a una superficie entre dos cuerpos en movimiento relativo. De manera geométrica, es la tangente del ángulo al que un bloque sólido empieza a deslizarse sobre un sustrato. [42]

Historia

El desarrollo humano se ha visto entrelazado con la utilización de la fricción dinámica. Los primeros usos tecnológicos de la fricción no fueron acompañados de explicación científica. Sin embargo, tuvieron un gran impacto en la sociedad. Uno de los primeros ejemplos de uso tecnológico se encuentra hace aproximadamente 71 000 años, el agarre por fricción, las puntas de piedra se fijaban a las empuñaduras, las cuales

estaban diseñadas para sujetar el utensilio, y además se envolvían fibras de cuero crudo para reforzar el agarre. [43]

Para las civilizaciones del mundo antiguo, existen múltiples aplicaciones, por mencionar algunas, se ha encontrado evidencia de los egipcios utilizando trineos lubricados para transportar estatuas de piedra, en un dibujo mural se muestra a 172 hombres tirando de un trineo de este tipo, con un hombre vertiendo lubricante delante de los corredores. En esta misma civilización, en la tumba de Yuua y Thuiu (1400 a.C.), se recuperó evidencia que confirma que los ejes de los carruajes egipcios estaban engrasados con grasa animal [43].

Sin embargo, es hasta el renacimiento en 1495 cuando Leonardo da Vinci, en su Códice Madrid I describe sus investigaciones experimentales de los fenómenos de rozamiento y desgaste. A Da Vinci se le atribuyen las observaciones que dan lugar a lo que actualmente se conocen como las dos leyes fundamentales de la fricción. [44]

Posteriormente, los hallazgos de Da Vinci fueron revisitados por el físico francés Guillaume Amontons, quien en 1699 formuló las dos leyes utilizadas para describir problemas de fricción. La primera ley establece que la fricción entre dos cuerpos es proporcional a la carga normal aplicada, la segunda ley dicta que la fricción es independiente del área de contacto aparente entre los dos cuerpos. [44-47]

En 1750, Leonard Euler estableció la distinción entre fricción estática, que resiste el inicio del movimiento y fricción dinámica, que actúa durante el deslizamiento continuo, así como la notación del coeficiente de fricción. Euler concibió el rozamiento como el acoplamiento de una serie de pequeñas irregularidades triangulares, en donde el coeficiente de fricción es igual a la pendiente de dichas irregularidades. [44]

En 1781, Coulomb, en su libro *Theorie des Machines Simples*, confirma los resultados de Amontons e identifica desviaciones empíricas de las leyes fundamentales del rozamiento, como el hecho de que la fuerza de rozamiento estático crece con el tiempo en reposo. Estas observaciones fueron la base para el desarrollo de la tribología moderna y el estudio de la fricción. [44]

Tipo de fricción (deslizamiento, rodamiento, combinado).

Fricción por deslizamiento

Fricción durante el movimiento relativo de dos cuerpos, sin ningún tipo de rodamiento. Este tipo de fricción es característico de los cojinetes de deslizamiento, objeto de interés para el presente trabajo.

Fricción de rodamiento

La fricción de rodamiento es la resistencia al movimiento que se produce cuando un objeto rueda sobre una superficie de apoyo. Se deben de distinguir dos casos diferentes, en el primer caso el cuerpo rodante tiene un contorno irregular; en el segundo, el cuerpo presenta una superficie geométrica que puede describirse mediante una ecuación. [1]

El término fricción de rodadura suele aplicarse al segundo caso, cuerpos con forma geométrica y baja rugosidad superficial. Para estos cuerpos, el componente de fricción asociado a la rugosidad es muy bajo, con coeficientes típicos en el rango de $5 \cdot 10^{-5}$ a

10^{-3} . Esta resistencia al movimiento no se debe a una única causa principal, sino a la combinación de varios mecanismos. [1]

Cada mecanismo actúa bajo determinadas condiciones, sin embargo, Rabinowicz establece algunas observaciones generales:

- La fuerza de fricción varía como una potencia de la carga. Para sistemas con cargas ligeras y deformación puramente elástica en el contacto, la fuerza de fricción crece con una potencia baja de la carga. Para sistemas con cargas elevadas y deformación plástica en el área de contacto, la dependencia puede llegar a ser de orden superior.
- La fuerza de fricción varía inversamente con el radio de curvatura de los elementos rodantes.
- La fuerza de fricción es menor en superficies con menor rugosidad. Casi siempre, la fricción de un dispositivo de rodadura disminuye durante el rodaje inicial, periodo en el que la acción de rodar mejora el acabado superficial.

2.4 Desgaste

Desgaste

El desgaste se define como el fenómeno de remoción de material de manera progresiva debido a la interacción de una superficie con otra superficie sujetas a movimiento relativo entre sí. El inicio de la remoción de material puede atribuirse a tres fenómenos que ocurren en las superficies de contacto, la adhesión, la abrasión y la fatiga superficial.

Existen diferentes mecanismos de desgaste, los cuales se caracterizan por la deformación y fractura de la región en contacto, los principales mecanismos son abrasión, adhesión, corrosión y fatiga. El mecanismo principal de desgaste puede variar de acuerdo a los cambios en las propiedades de la superficie del material, cambios en la temperatura debido a la fricción, o bien por la presencia de contaminantes en las superficies en contacto. [48-52]

Desgaste Adhesivo

El mecanismo de desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies se deslizan una sobre otra y los fragmentos de una cara se desprenden y se adhieren a la otra durante el movimiento relativo. Posteriormente, estos fragmentos pueden desprenderse de la superficie donde se formaron y transferirse de nuevo a la superficie original, o bien generar partículas de desgaste sueltas. [1]

Por otro lado, la formación de un fragmento suelto es permanente, y esto afectará negativamente la vida útil del cojinete. Podríamos generalizar esta distinción diciendo que la formación de fragmentos transferidos a menudo no es permanente en un movimiento deslizante con múltiples pasadas, pero que resulta irreversible en un único deslizamiento. [1]

En la práctica, la importancia del comportamiento de las partículas depende de la geometría de deslizamiento, para un cojinete de deslizamiento, la transferencia de un fragmento de una superficie a otra no suele ser perjudicial para la vida útil del cojinete si, en una fase posterior, el fragmento puede volver a transferirse a su superficie original. Por otro lado, la formación de un fragmento suelto es permanente, afecta negativamente la vida útil del rodamiento.

Este mecanismo es común en metales no lubricados, particularmente relevante cuando las superficies en contacto son químicamente compatibles (tribológicamente incompatibles). Las condiciones que favorecen el mecanismo de desgaste adhesivo, tales como las altas cargas de contacto, temperaturas y presiones o superficies libres de capas de óxido o contaminantes.

Desgaste por abrasión.

El desgaste por abrasión se caracteriza por la remoción de material de una superficie más blanda por la acción de una superficie más dura, así como por la remoción cuando existen partículas duras sueltas entre dos superficies. La remoción de material ocurre debido a que las partículas remueven un volumen de material en forma de microvirutas, formando surcos abrasivos en la superficie más blanda. [50, 53, 54]

El desgaste abrasivo se puede clasificar en abrasión de dos cuerpos y abrasión de tres cuerpos. La abrasión de dos cuerpos se genera cuando el desgaste es causado por asperezas de una superficie en contacto y éstas son las causantes de eliminar directamente el material de la superficie opuesta.

La abrasión de tres cuerpos, como su nombre lo indica, requiere de la presencia de partículas duras sueltas las cuales se encuentran en la zona de contacto, causando desgaste en una o ambas superficies. Las partículas pueden originarse de contaminantes externos o haberse producido por el desgaste mismo. [55]

En el desgaste abrasivo se presentan mecanismos como el arado, donde el material se desplaza hacia los lados de la ranura de desgaste, sin ser removido; el corte, donde el material se elimina en forma de virutas; y la fragmentación, donde la acción abrasiva causa fractura localizada y desprendimiento de material. [55]

Desgaste por fatiga.

El desgaste por fatiga ocurre típicamente en contacto rodante. El desgaste se presenta debido a esfuerzos cortantes en el interior del material, la acción repetida de rodadura genera esfuerzos alternos de compresión y tracción. Los esfuerzos cíclicos conducen a la formación de microgrietas que corren paralelas a la superficie, hasta alcanzar una extensión crítica donde se provoca el desprendimiento de material. El desprendimiento continuo puede conducir al desconchado o descamación.[50, 54]

Corrosivo

El desgaste corrosivo se debe a la combinación sinérgica de la corrosión química y el desgaste mecánico. La superficie del material interactúa químicamente con el medio corrosivo al que está expuesto, provocando la creación de productos de corrosión. El deslizamiento, el roce o el impacto, expulsan estos residuos de corrosión debilitados de

la superficie. El proceso de eliminación expone material lo que facilita la continuación del ciclo. [54]

El desgaste corrosivo puede interactuar con otros mecanismos de desgaste. Cuando el desgaste corrosivo interactúa en conjunto con el desgaste adhesivo, el contacto elimina de manera constante la capa de óxido en la superficie del metal, lo que incrementa la velocidad de la corrosión. En el caso de una combinación de desgaste corrosivo y desgaste abrasivo, las partículas duras eliminan los residuos de corrosión de la superficie, acelerando el proceso corrosivo.

Combinado

El desgaste en los elementos mecánicos es por lo general multifactorial, los componentes experimentan una combinación de diferentes mecanismos de desgaste los cuales actúan de manera simultánea o secuencial. En el caso de los cojinetes, los mecanismos involucrados son el desgaste adhesivo, debido al contacto directo entre elementos y el desgaste abrasivo debido a suciedad, partículas metálicas o contaminantes. [56]

De los mecanismos tratados en las secciones anteriores, si bien el desgaste adhesivo se considera la forma más universal de desgaste, su progresión suele ser relativamente benigna y su aparición gradual. Por el contrario, es la aparición de otras formas de desgaste, por ejemplo, el desgaste abrasivo, lo que produce índices de desgaste inesperadamente elevados y el fallo prematuro del mecanismo. [1]

Debido a la complejidad de la interacción entre mecanismos de desgaste y las transiciones que pueden darse entre ellos, así como la influencia de las condiciones de operación, se han realizado modelos de mapa de desgaste. Los mapas de desgaste permiten representar el comportamiento de desgaste de los materiales bajo diversas condiciones de funcionamiento, en función de parámetros como carga, velocidad, temperatura o presión.

Un ejemplo representativo fue propuesto en 1987 por Lim y Ashby, quienes construyeron un mapa de desgaste para predecir el desgaste de aceros. Para la construcción de dicho mapa de desgaste, se asumió como variable dominante la temperatura de las asperezas en el contacto, durante el deslizamiento en seco de aceros, ensayados en un dispositivo perno sobre disco. [56]

A través de los años, muchos modelos para predecir el desgaste han sido propuestos para una variedad de materiales y condiciones. No obstante, la mayoría de los modelos son construidos para materiales específicos, geometrías de contacto concretas, intervalos acotados de carga o velocidad, y entornos controlados con lubricantes definidos. Lo específico de los modelos limita su aplicación general, además, si bien el concepto de mapa de desgaste ha sido útil como herramienta pedagógica y de diseño en algunos contextos, estos modelos tienden a representar mecanismos que no suelen manifestarse en sistemas con un mantenimiento adecuado. [56]

2.5 Factores que alteran la respuesta al desgaste

Ley de Archard

El estudio del desgaste ha sido predominantemente empírico debido a la complejidad del fenómeno. Como se ha comentado en las secciones anteriores, el desgaste depende de múltiples factores, incluyendo las propiedades de los materiales en contacto, las condiciones del contacto y el entorno. Para predecir el desgaste, se han desarrollado diferentes modelos, siendo la Ley de Desgaste de Archard utilizada durante más de siete décadas.[57, 58]

La Ley de Archard, propuesta en 1953, proporciona un modelo empírico para el desgaste por deslizamiento. Establece que el volumen total de material desgastado es directamente proporcional a la carga normal aplicada y a la distancia de deslizamiento, e inversamente proporcional a la dureza del material a analizar. [59]

$$V = KNL/H$$

En donde

- V - volumen total de material desgastado.
- K - coeficiente de desgaste.
- N - carga normal aplicada entre las superficies en contacto.
- L - distancia total de deslizamiento.
- H - dureza del material más blando de los dos en contacto.

El coeficiente de desgaste (K) es un parámetro adimensional que representa la probabilidad de formación de partículas de desgaste a partir de los encuentros entre asperezas. No obstante, el valor de K no es una propiedad intrínseca del material, depende del tribopar, las condiciones de lubricación y el entorno.

Además de representar la probabilidad de formación de partículas de desgaste, K también puede interpretarse como la fracción del volumen total deformado plásticamente que se convierte en desgaste, la fracción de la potencia total disipada que contribuye al desgaste, o incluso como un factor que refleja la influencia de la fricción y las películas superficiales.

Al notar que la fuerza horizontal $T = \mu N$, multiplicada por la distancia recorrida es la energía total transformado en calor Q debido a la fricción, se puede reformular la ley de Archard como:

$$V = \frac{KQ}{\mu H}$$

Esta interpretación no requiere de hipótesis sobre las condiciones exactas del contacto, ya que asocia la irreversibilidad del proceso (cantidad de trabajo mecánico convertido en calor) como “fuerza” impulsora para el desgaste.

También supera el problema que la dureza no caracteriza, por lo general, la resistencia al desgaste en un tribopar específico. Se ha encontrado que la energía que el material puede absorber antes de fallar es una medida más objetiva para definir la resistencia la

desgaste. Para un material frágil, ésta está proporcional a la dureza, pero para un material dúctil, se caracteriza por la tenacidad [60-63]

A pesar de su utilidad, debido a las suposiciones y simplificaciones, la Ley de Archard presenta limitaciones. No considera la dureza del material más duro en el par de contacto, el tamaño y la forma de las partículas de desgaste generadas, ni los cambios en la dureza del material que pueden ocurrir durante el proceso de desgaste. El problema del uso de dureza para caracterizar la resistencia al desgaste ya se mencionó.

Para abordar estas limitaciones, Rabinowicz propuso un criterio alternativo para la formación de partículas de desgaste basado en el equilibrio entre la energía elástica almacenada en el material y el trabajo de adhesión necesario para generar nuevas superficies, el cual se ha buscado incorporar mediante una ley generalizada del desgaste. Además, se han desarrollado modelos que distinguen el comportamiento en diferentes regímenes de desgaste, diferenciando entre la etapa inicial de desgaste y el estado estacionario que se alcanza después de la etapa de rodaje.[64,65].

Endurecimiento (procesos en frío)

El endurecimiento por trabajo en frío es un fenómeno mediante el cual un material dúctil incrementa su dureza como consecuencia de la deformación plástica a temperaturas inferiores a su punto de recristalización. Durante este proceso se genera una modificación en la estructura cristalina, los granos se elongan en la dirección de la deformación y se induce un aumento en la densidad de dislocaciones.

Las modificaciones provocadas en el material durante el trabajo en frío tienen consecuencias en el comportamiento del material frente al desgaste, una mayor densidad de dislocaciones dificulta el deslizamiento plástico, por lo que la superficie es menos susceptible a la abrasión o la fatiga por contacto rodante.[66]

Respecto a la inferencia del endurecimiento por trabajo en frío ante el desgaste, utilizando la Ley de Archard el volumen de material desgastado es inversamente proporcional a la dureza (H), la cual aumenta durante el endurecimiento. Sin embargo, el coeficiente de desgaste (K) se ve afectado, pues se modifica ante cambios en la tenacidad a la fractura o en la resistencia a la adhesión superficial, puesto que pueden inducir la formación de partículas de desgaste.

La rugosidad superficial inicial modifica la evolución del endurecimiento por trabajo en frío, superficies con mayor rugosidad tienen concentraciones de deformación plástica. La deformación localizada favorece la acumulación de dislocaciones, acelerando la tasa de endurecimiento en la capa superficial del material.

3. Procedimiento Experimental

3.1 Fundición

La aleación fue diseñada por el grupo de trabajo, y preparada en forma de lingote. Estos lingotes, posterior a su mecanizado, se laminaron y se utilizan en el presente trabajo. Los metales utilizados en el proceso de fundición fueron cobre electrolítico con 99.9% de pureza, magnesio electrolítico con 99.7% de pureza y estaño de pureza comercial.

La fundición se realizó en un horno de crisol de gas LP. El crisol está hecho de grafito, ya que los crisoles convencionales basados en silicatos refractarios reaccionan con el Mg. Idealmente se debería emplear un horno con atmósfera controlada. Sin embargo, al no disponer de tal equipo, se protegió el metal fundido mediante una capa de grafito. Para prevenir la contaminación y pérdida de calor, todas las herramientas están producidas de grafito o recubiertas con este material y precalentadas antes de su uso.

El cobre y el estaño fueron introducidos en el crisol al encender el horno, junto a una pequeña cantidad de polvo de grafito, que protege a los metales de la oxidación. Posteriormente se agregó el magnesio previamente precalentado a 450°C a través de un tubo de grafito hasta el fondo del crisol, de tal manera que no entra en contacto con la atmósfera una vez fundido. De la misma manera, se incorporó una pastilla desgasificadora de CaCO₃ precalentada a 600°C al final del proceso. Cabe indicar que el grafito es un desoxidante más fuerte para el Cu que el Mg, por lo que también se previene la oxidación de este último.

3.2 Laminado

Los lingotes obtenidos tras el proceso de fundición fueron cortados longitudinalmente por la mitad, procedimiento realizado con un disco de corte. Se realizó a cada sección un rectificado y careado de las superficies con una fresadora CNC para garantizar una pieza de espesor y acabado superficial uniforme previa al laminado.

Es poco común el proceso de laminado en frío partiendo de lingotes. Por la experiencia en el grupo y con la finalidad de maximizar la energía almacenada previo al proceso de recristalización, el grupo de trabajo desarrolló un procedimiento para laminar lingotes sin causar fractura. Este proceso se ha aplicada de manera exitosa a aleaciones Al-Sn [67-68] y Cu-Mg-Sn [24].

El proceso de laminado en frío se realizó con una reducción inicial del 2 % en la primera pasada, 4% en la segundo, aumentando progresivamente hasta llegar a un 10 %. Esta última se mantuvo hasta alcanzar el 10% del espesor inicial. Entre cada paso, la pieza resultante se giró 180 grados con respecto a costado, de tal manera que la cara en contacto con el cilindro superior, estuviera en contacto con el cilindro inferior en el siguiente paso, respetando una sola dirección durante el laminado, lo anterior permitió minimizar la formación de curvaturas en la lámina debido a una ligera desalineación de los rodillos.

3.3 Ensayo de Tracción

Probetas de ensayo de tracción

Debido a la geometría irregular de las láminas obtenidas, se dibujaron rectángulos de dimensiones aproximadas de 11 cm por 2.7 cm, en donde el lado transversal del rectángulo estuviera en paralelo con la dirección de laminado. Una vez que se lograba dibujar el máximo número de rectángulos que se pudiesen generar sin atravesar ningún defecto de laminación, se recortaron los rectángulos con cizalla.

Las probetas de tracción se maquinaron en una fresadora vertical de CNC EMCO modelo EMCO-F1-CNC, con un cortador vertical de $\frac{1}{2}$ " de 4 gavilanes, a una velocidad de 800 rpm y avance de 50 mm por minuto, utilizando aceite para corte, lo cual garantiza una alta precisión dimensional y un acabado libre de rebabas en los bordes. Las probetas se fabricaron conforme a la norma ASTM E8, con dimensiones reducidas de 6 mm, las cuales se especifican en la Figura 3, con espesores variables de entre 0.8 mm y 1 mm.

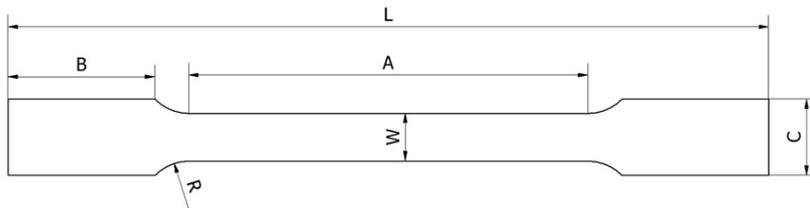


Figura 3. Esquema de una probeta de tracción ASTM E8

Tabla 1. Dimensiones probetas de ensayos de tracción

Dimensiones	
	[mm]
G- Longitud de galga	25.0 ± 0.1
W- Ancho	6.0 ± 0.1
R- Radio del filete, min	6
L- Longitud total, min	100
A- Longitud de la sección reducida, min	32
B- Longitud de la sección de agarre, min	30
C- Ancho de la sección de agarre, aproximado	10

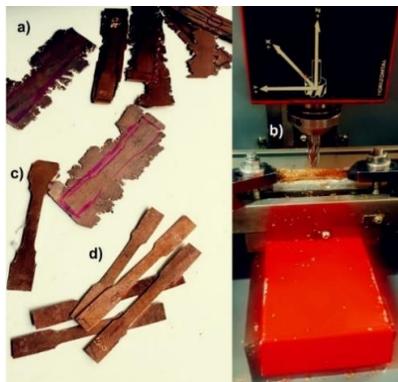


Figura 4. Proceso de maquinado de las probetas de ensayo de tracción. Indicado con las letras a) muestras laminadas b) proceso de fresado c) probetas fresadas d) acabado final

Tratamiento térmico. Probetas de Tracción

Después de maquinar las probetas de tracción se realizó un tratamiento térmico de recocido, el cual se explica con mayor detalle a continuación. Antes del tratamiento térmico, de manera preventiva, las probetas fueron lavadas bajo el chorro de agua a presión, con el fin de evitar restos del aceite para corte.

Antes de realizar el tratamiento térmico, el horno fue precalentado durante 30 minutos a la temperatura objetivo a la cual se realiza el tratamiento, con el fin de garantizar una temperatura estable al momento de introducir las piezas. Las probetas destinadas a los ensayos de tracción fueron divididas equitativamente (Tabla 2) y sometidas a cuatro condiciones térmicas: sin tratamiento térmico (laminado en frío), recocido a 400°C, 500°C o 600°C. Tras 30 minutos de tratamiento térmico, las probetas se retiraron del horno y fueron enfriadas al aire a temperatura ambiente. Estas condiciones se determinaron en base de una serie de ensayos exploratorios efectuados anteriormente en el grupo de trabajo.

Tabla 2. Tratamientos térmicos

Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Número de probetas
400	30	4
500	30	4
600	30	4
Sin tratamiento	----	4

Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina universal de pruebas mecánicas Shimadzu AG-250. Los ensayos se llevaron a cabo a temperatura ambiente, con una velocidad de 5 mm/min, en un modo de ensayo sencillo. Para garantizar la alineación paralela de la probeta con respecto a las mordazas, se alineó la probeta con ayuda de una escuadra de ángulo recto. Antes de iniciar el ensayo, se referenció en cero la medición de fuerzas y posición.

Resultados ensayo de tracción

A continuación, en la Figura 5, se presentan las gráficas de los ensayos de tracción, las cuales se han corregido contemplando la rigidez de la máquina y se han calculado de acuerdo al espesor de cada una de las probetas.

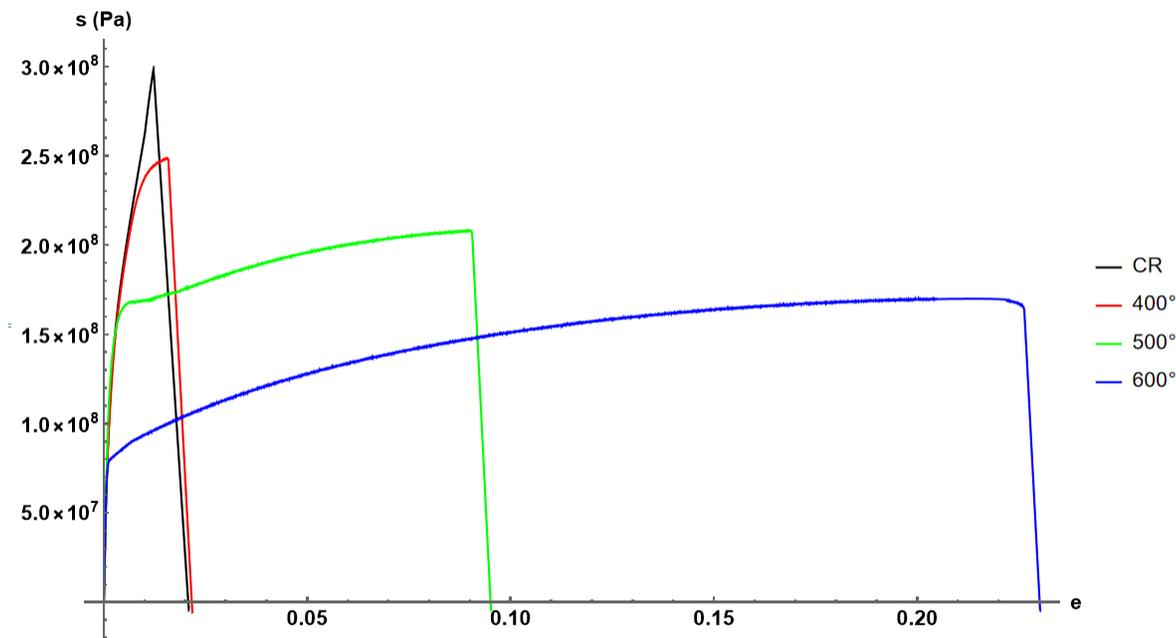


Figura 5. Gráficas de esfuerzo-deformación obtenidas durante el ensayo de tracción para cada uno de los tratamientos térmicos. Se muestra una curva representativa para cada condición.

Tabla 3. Datos del ensayo de tracción

Tratamiento	Tenacidad (J/m ²)	Esfuerzo máximo (Pa)	Deformación uniforme	$\sigma_{0.2}$ (MPa)
CR	1.44E+06	2.98392E+08	-	1.67E+08
400	2.78E+06	2.48508E+08	1.56E-02	1.62E+08
500	1.08E+07	2.07956E+08	8.97E-02	1.58E+08
600	3.04E+07	1.69886E+08	2.13E-01	8.23E+07

El material deformado en frío presenta el mayor esfuerzo máximo, pero con una tenacidad reducida, al ser una fractura frágil no se habla de deformación uniforme, ya que no se forma un cuello en la probeta antes de la fractura. Tras el recocido a 400 °, la ductilidad mejora ligeramente. Tanto para la muestra sin recocido, existe el rango plástico, con un endurecimiento muy significativo, lo que explica el valor relativamente bajo de $\sigma_{0.2}$ para estos materiales. A 500 ° se obtiene el punto de compromiso óptimo entre tenacidad y máximo esfuerzo. A 600 °, la ductilidad y tenacidad están en su valor máximo, pero el esfuerzo máximo decae considerablemente.

3.4 Muestras metalográficas

Las muestras destinadas a la caracterización metalográfica fueron recortadas con una tijera para lamina, en piezas con medidas de aproximadamente 1.5 cm por cada lado. Posteriormente fueron divididas equitativamente y sometidas a cuatro condiciones térmicas: sin tratamiento térmico (laminado en frío) o recocido a 400°C, 500°C o 600°C, con un tiempo de 30 minutos en cada caso.

La preparación de las muestras metalográficas se realizó mediante técnicas estándares [69]. Las muestras fueron lijados utilizando lijas de agua de carburo de silicio en el siguiente orden, 180, 400, 500, 800/P1500, y 1200/P2500, asegurando antes de proceder al siguiente tamaño, la eliminación de las marcas del lijado anterior.

Posteriormente, con productos de la marca Presi línea Reflex, se llevó a cabo el pulido mediante paños impregnados con suspensión de diamante de 3 µm y 1 µm, utilizando lubricante en ambos casos. El paño azul utilizado en conjunto con la suspensión de 3 µm y el paño rojo con la de 1 µm. La pulidora MetaServ250 operó a 70 rpm en giro antihorario. Después de cada cambio de paño se requirió enjuagar la muestra con abundante agua bajo presión.

Finalmente, se terminó el pulido con un paño negro y solución de sílica (1 parte de sílica por 3 partes de agua). Durante este proceso, la pulidora se utilizó a una velocidad de 50 rpm manteniendo el flujo de agua constante para prevenir la formación de cristales que pudieran dañar la superficie de la muestra.

3.5 Ensayos Tribológicos

Ensayos de desgaste

Los ensayos de desgaste se realizaron utilizando una consola de marca NANOVEA modelo Nanovea/MC para caracterización de superficies. El ensayo corresponde a una configuración perno sobre disco, como perno se utilizó una esfera de acero 52100. La esfera se pone en contacto con la superficie y describe un camino circular con diámetro de 2 mm. Cada ensayo tuvo una duración de 1 hora a una velocidad de 2.5 rpm. En cada probeta se realizaron 4 ensayos diferentes, la carga aplicada fue de 4N, 6N, 8N y 10N respectivamente.

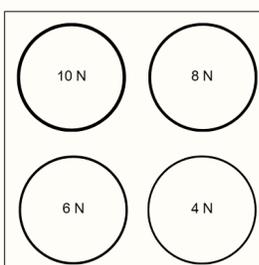


Figura 6. Esquema de una probeta con 4 ensayos de desgaste.

La experimentación se llevó a cabo en dos etapas diferentes, con el objetivo de obtener datos estadísticamente representativos. Como se ha explicado, se realizaron 4 ensayos

de desgaste por cada carga, lo que para ambas repeticiones da un total de 32 ensayos, en la Tabla 4 a continuación se explica de mejor manera su distribución.

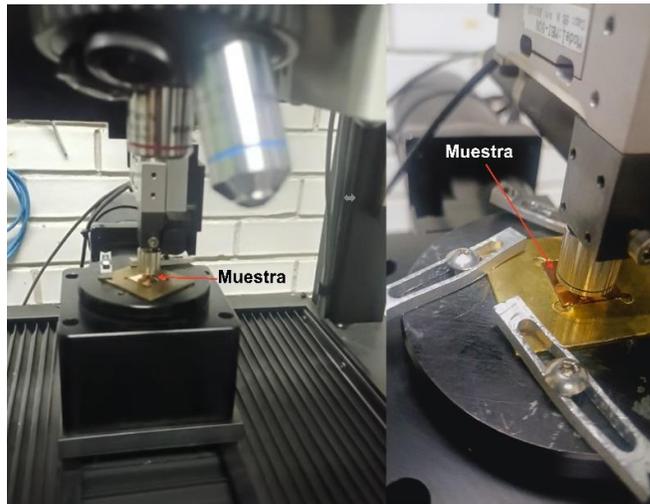


Figura 7. Ensayo de desgaste. Ensayo en proceso

Tabla 4. Esquema de experimentación. División por tratamiento térmico y carga aplicada, así como la repetición

Primera Etapa			Segunda Etapa		
Tratamiento térmico	Carga	Ensayo de desgaste	Tratamiento térmico	Carga	Ensayos
Laminado en frio	4	1	Laminado en frio	4	1
	6	1		6	1
	8	1		8	1
	10	1		10	1
Recocido 400	4	1	Recocido 400	4	1
	6	1		6	1
	8	1		8	1
	10	1		10	1
Recocido 500	4	1	Recocido 500	4	1
	6	1		6	1
	8	1		8	1
	10	1		10	1
Recocido 600	4	1	Recocido 600	4	1
	6	1		6	1
	8	1		8	1
	10	1		10	1

Ensayos de fricción

Los ensayos de fricción, por su parte, se realizaron con la consola NANOVEA, utilizando una esfera de acero 52100, en configuración recíprocante, con una longitud de desplazamiento de 5 mm, 20 ciclos y a una velocidad de 31.41 mm/min, calculada a partir del perímetro y la velocidad de giro del ensayo de desgaste. Se aplicaron las mismas cargas que en los ensayos de desgaste, es decir, por cada muestra se realizaron 4 ensayos variando la carga aplicada.

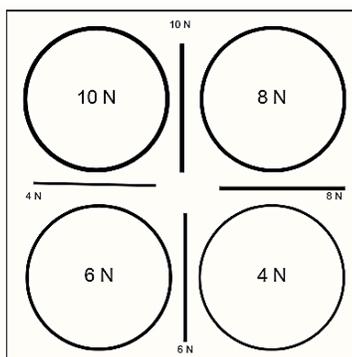


Figura 8. Esquema de una probeta con 4 ensayos de desgaste y 4 ensayos de fricción

La experimentación se llevó a cabo en dos etapas diferentes, con el objetivo de obtener datos estadísticamente representativos. Se realizaron 4 pruebas recíprocantes, una por cada carga, con 20 vueltas cada una, lo que da un total de 1280 graficas de fricción, distribuidas de la siguiente manera.

Tabla 5. Esquema de experimentación. Ensayos

Primera etapa			Segunda Etapa		
Tratamiento térmico	Carga	Ensayos	Tratamiento térmico	Carga	Ensayos
Laminado en frío	4	40	Laminado en frío	4	40
	6	40		6	40
	8	40		8	40
	10	40		10	40
Recocido 400	4	40	Recocido 400	4	40
	6	40		6	40
	8	40		8	40
	10	40		10	40
Recocido 500	4	40	Recocido 500	4	40
	6	40		6	40
	8	40		8	40
	10	40		10	40
Recocido 600	4	40	Recocido 600	4	40
	6	40		6	40
	8	40		8	40
	10	40		10	40

Ensayos de microdureza

Para los ensayos de microdureza se utilizó un indentador tipo Vickers, bajo la modalidad de indentación instrumentada en el equipo NANOVEA, con adquisición de datos a 300 Hz, con una carga aplicada de 1 N y una distancia entre cada ensayo de 0.2 mm, asegurando una separación entre indentaciones de al menos 3 veces la magnitud de la diagonal. Se elaboraron en cada probeta 20 indentaciones, en diferentes zonas en zonas lo más alejadas posible de las huellas de desgaste.

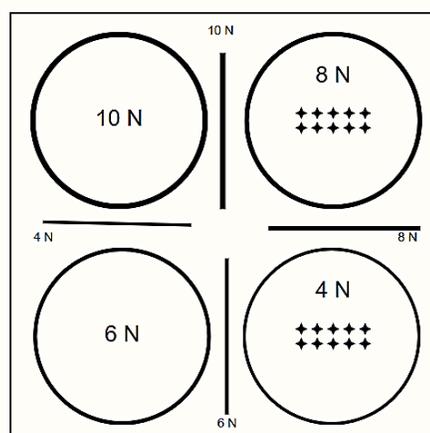


Figura 9. Esquema de una probeta con 4 ensayos de desgaste, 4 ensayos de fricción y mediciones de dureza en 2 zonas.

Las mediciones de dureza se obtuvieron en HV, con apoyo del programa NMHTS (paquetería de la consola NANOVEA), para esto se utilizó el microscopio óptico Olympus U-5RE-2 con el objetivo MPlan 50x/0.75. Dentro de la paquetería utilizada, se localizaron los puntos correspondientes al inicio y final de cada una de las diagonales de la huella, es decir, la magnitud de las diagonales, con las cuales se calcula la dureza en base a la siguiente fórmula. En donde la F es la carga aplicada en kg y D se mide en mm

$$HV = \frac{1.854 \cdot F}{D}$$

$$D = \frac{D1 + D2}{2}$$

Durante esta medición, se diferenciaron la dureza medida en base a la diagonal paralela al sentido de laminación y la dureza calculada a partir de la diagonal perpendicular al sentido de laminación.

Perfilometría óptica

Para el análisis de las huellas de desgaste se utilizó el perfilómetro óptico del equipo NANOVEA, utilizando el programa Mech 3D Scan. Se configuró en una frecuencia de adquisición de datos de 300 Hz. Por cada huella de desgaste se realizaron 2 mediciones de 600 micras por 400 micras, con un paso de 2 micras para ambas direcciones. Cada

medición tiene una duración aproximada de 2 horas y un tamaño de 300 ×200 píxeles, con el valor del pixel representado la altura en este punto.

Las mediciones se realizaron considerando los siguientes aspectos:

- Para designar cuál eje (x o y) es el de magnitud mayor (600 micras), se eligió aquel que fuese perpendicular con el perímetro de la huella en la zona designada.
- Se consideró en todo momento la dirección de laminado, de tal manera que se tiene una medición, denominada “Rolling Direction” (RD), paralela a la dirección de laminado y una medición, denominada “Transversal Direction” (TD) perpendicular a la dirección de laminado.
- En caso de resultar insuficiente el área de 600 por 400 se optó por una medición de 900 por 600 a un paso de 3 micras.

Al finalizar, se obtuvieron 32 perfiles organizados de la siguiente manera

Tabla 6. Esquema de experimentación. Perfilometría

Tratamiento térmico	Carga	TD	RD	Dimensiones RD [μm]	Dimensiones TD [μm]
Laminado en frío	4	1	1	600 x 400	400 x 600
	6	1	1	600 x 400	400 x 600
	8	1	1	600 x 400	400 x 600
	10	1	1	900x600	600 x 900
Recocido 400	4	1	1	600 x 400	400 x 600
	6	1	1	600 x 400	400 x 600
	8	1	1	600 x 400	400 x 600
	10	1	1	600 x 400	400 x 600
Recocido 500	4	1	1	600 x 400	400 x 600
	6	1	1	600 x 400	400 x 600
	8	1	1	600 x 400	400 x 600
	10	1	1	600 x 400	400 x 600
Recocido 600	4	1	1	600 x 400	400 x 600
	6	1	1	600 x 400	400 x 600
	8	1	1	600 x 400	400 x 600
	10	1	1	600 x 400	400 x 600

La posición de las mediciones sobre la muestra se observa en la Figura 10, en la cual se omitieron los ensayos de fricción para no sobresaturar el esquema.

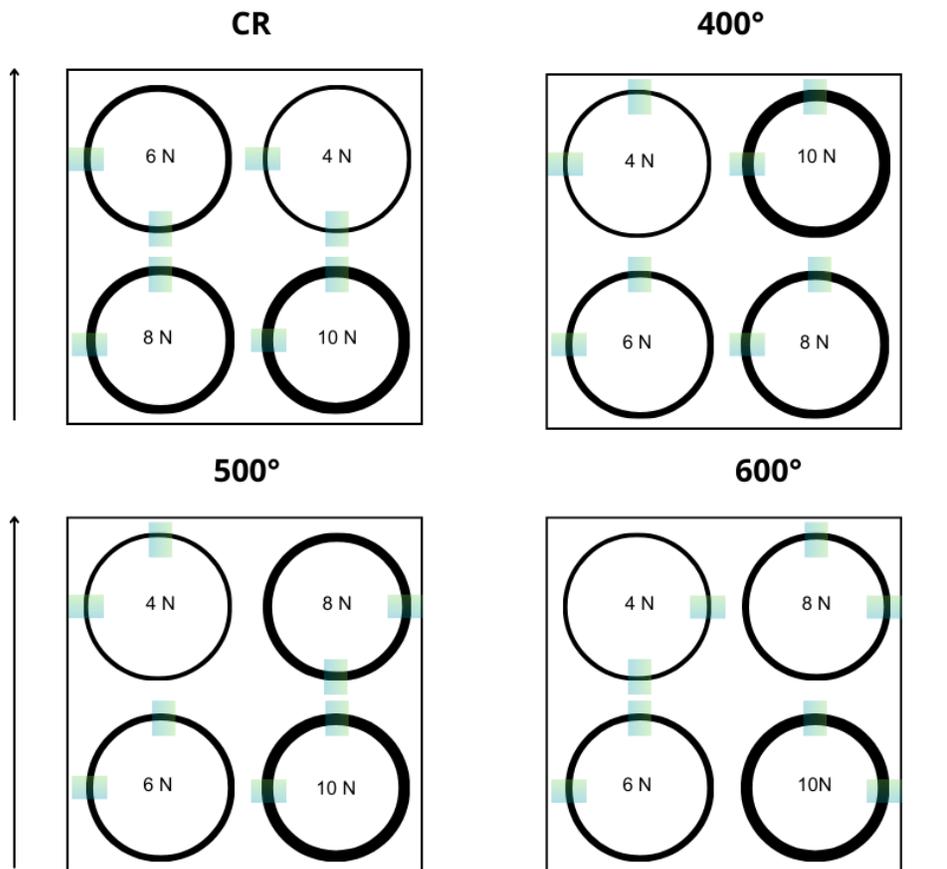


Figura 10. Distribución de las zonas analizadas mediante perfilometría óptica. Las flechas indican la dirección de laminación.

4. Resultados

4.1 Microestructura

Se analizaron los cambios microestructurales provocados por el laminado en frío, así como para cada uno de los tratamientos térmicos mediante EBSD.

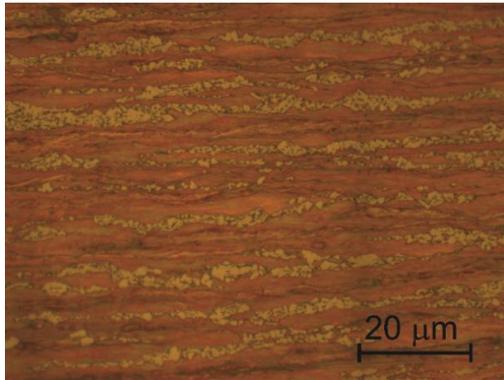


Figura 11. Observación en microscopía óptica de la aleación Cu 2Mg 2Sn laminado en frío. La fase clara es el intermetálico Cu_4MgSn , fracturado durante el laminado. [20].

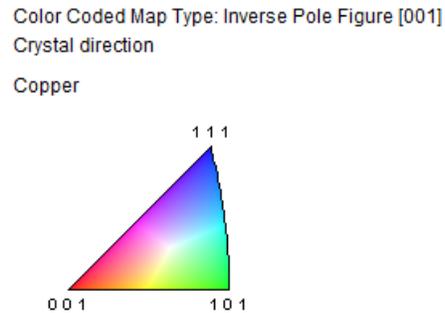


Figura 12. Leyenda de colores para las orientaciones en los mapas obtenidos mediante patrones de difracción de electrones retrodispersados (EBSD) en el microscopio electrónico de barrido.

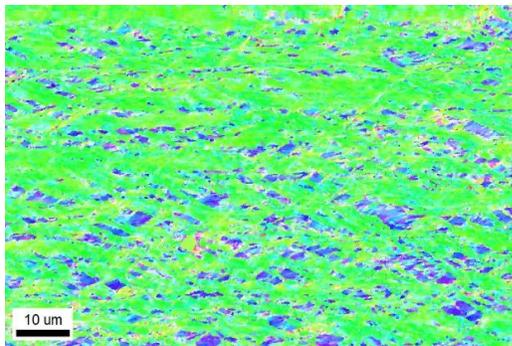


Figura 13. Microestructura del material deformado en frío, obtenida mediante EBSD, mostrando la heterogeneidad inducida por las partículas intermetálicas. Nótese que estas partículas se identificaron como cobre en el análisis y no son visibles como tal. (Cortesía R.Schouwenaars).

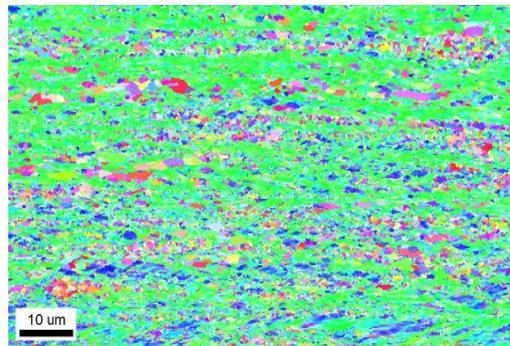


Figura 14. Microestructura después de un recocido a 400°C. La mayor parte de los granos mantienen la orientación que tenían en el estado laminado, indicando un proceso de recuperación. Entre las bandas de granos recuperados, se observan núcleos recristalizados. (Cortesía R.Schouwenaars).

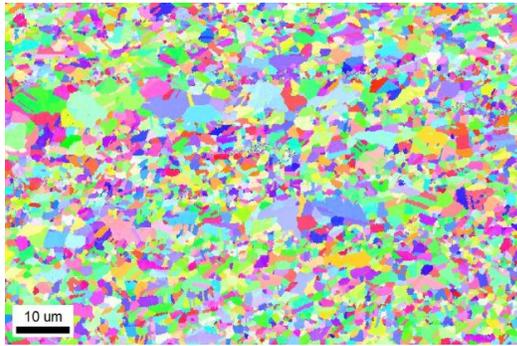


Figura 15. Material recrystallizado a 500°C. Se observa un tamaño de grano bimodal, el crecimiento de los granos está impedido por la presencia de los intermetálicos. En los granos más grandes, se observan maclas de recrystalización.

(Cortesía R.Schouwenaars).

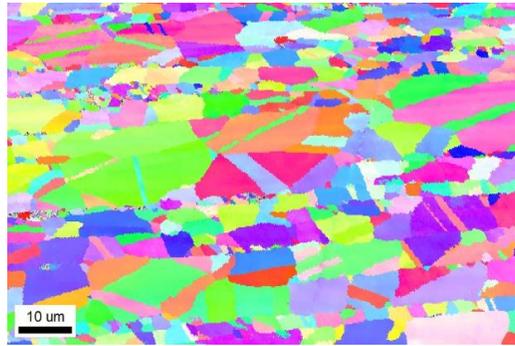


Figura 16. Material recrystallizado a 600°C. La disolución de los intermetálicos a esta temperatura permite un crecimiento de grano fuerte. Las bandas definidas anteriormente por la segunda fase se siguen observando como límites de grano.

(Cortesía R. Schouwenaars)

Dureza

Los datos obtenidos de dureza se muestran en la Figura 17, en la cual se evidencia la mayor dureza del material laminado en frío en comparación con el material que recibió algún tratamiento térmico.

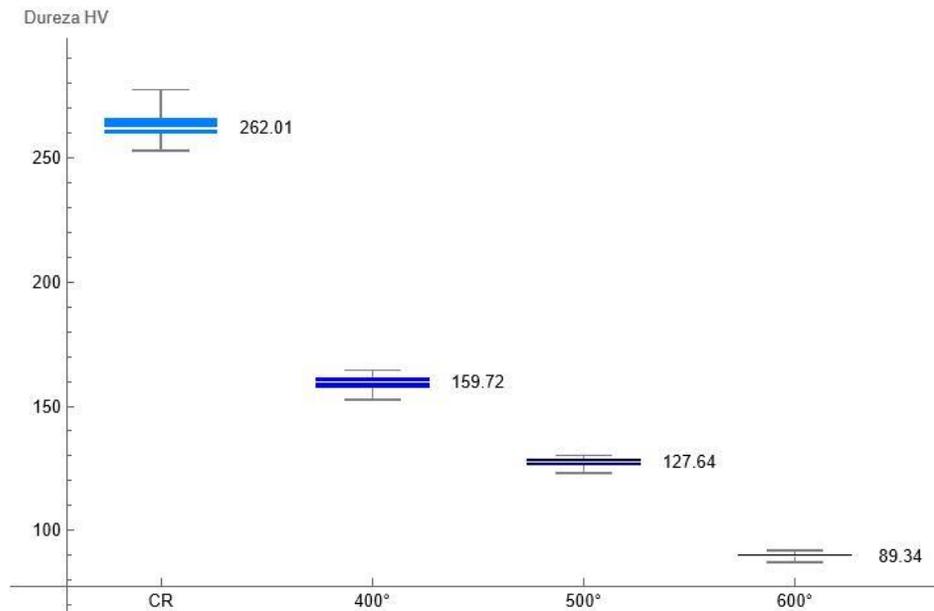


Figura 17. Diagrama de caja y bigotes sobre la distribución estadística de los valores de dureza obtenidos para condición de tratamiento térmico.

Con el objetivo de mejorar la visualización de los datos presentados en el gráfico anterior, los resultados de microdureza Vickers se resumen en la Tabla 7, en la que se muestran los valores mínimos, cuartiles, mediana y máximo para cada condición térmica.

Tabla 7. Microdureza Vickers. Valores mínimos, cuartiles, mediana y máximo para cada condición térmica.

Tratamiento	Min	Q1 (25%)	Mediana	Q3 (75%)	Max
CR	253	259	262	266	277
400	153	157	158	161	165
500	123	126	128	129	130
600	87	89	89	90	92

Dado que no hay traslape entre los rangos de dureza y que cada serie de mediciones contiene 20 mediciones, no es necesario ejecutar un análisis estadístico avanzado, se ve claramente que las diferencias de dureza son significativas. La dureza disminuye conforme la temperatura del recocido incrementa.

4.2 Fricción

Las figuras 18 y 19 presentan los registros del comportamiento del coeficiente de fricción de acuerdo al tratamiento térmico y a la condición de carga. Las gráficas corresponden a la primera etapa de experimentos y a la segunda etapa respectivamente. La escala de colores se presenta para poder diferenciar la evolución del ensayo en el tiempo. Dentro de la serie de 40 ensayos, se asignó una escala que evoluciona de azul claro a negro, es decir, los colores cian corresponden a los primeros ensayos (1-10), el azul a los ensayos intermedios y el negro a los últimos ensayos (30-40).

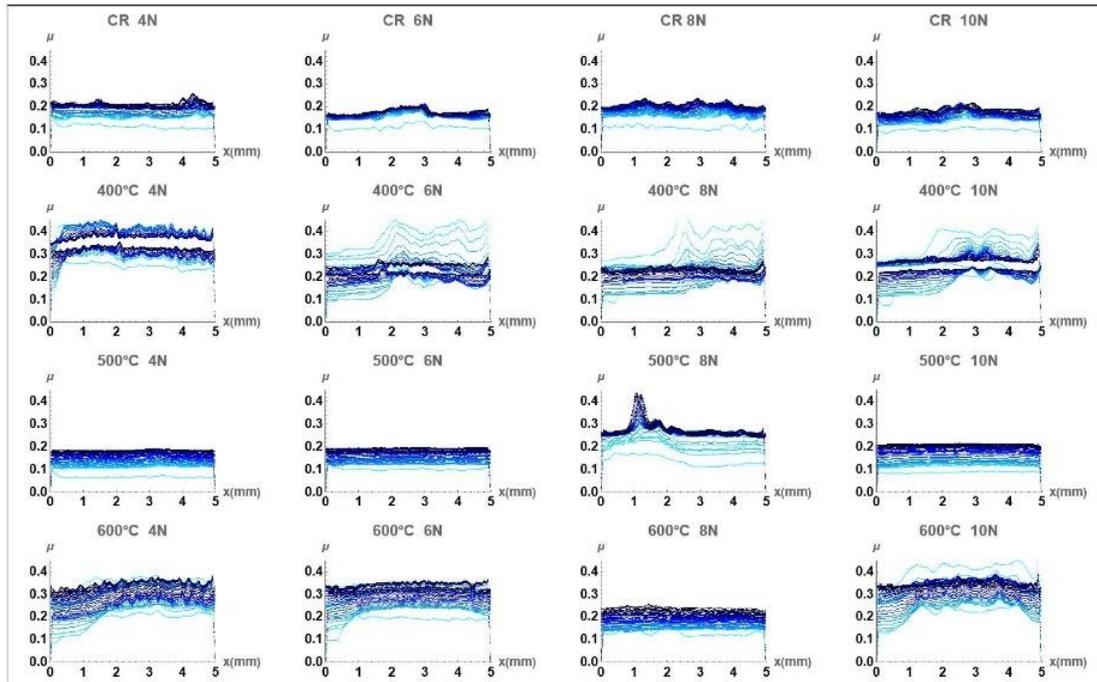


Figura 18. Comportamiento del coeficiente de fricción de acuerdo al tratamiento térmico y a la carga. Etapa 1

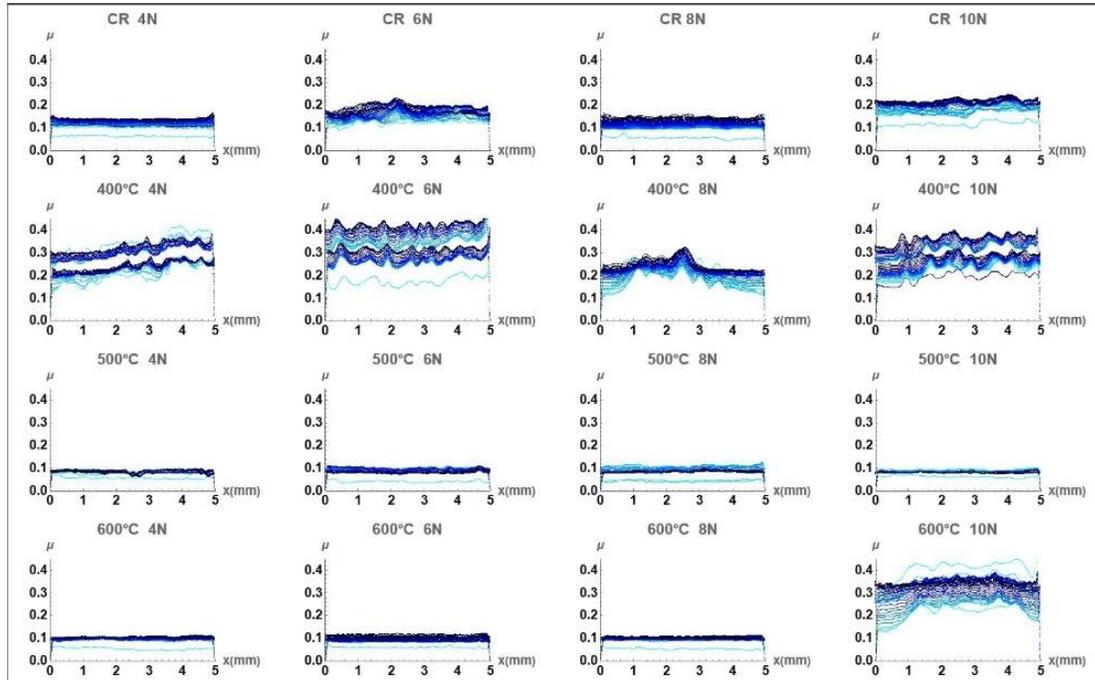


Figura 19. Comportamiento del coeficiente de fricción de acuerdo al tratamiento térmico y a la carga. Etapa 2

En las gráficas de la Figura 18 se observan curvas correspondientes a los primeros ensayos por arriba y por debajo del comportamiento de los ensayos finales, ejemplificado claramente en el caso del material recocido a 400° esto corresponde a que los ensayos de fricción se componen por ciclos, cada uno realiza una ida y una vuelta sobre el mismo trayecto, esto se ejemplifica mejor en la Figura 20 A, en donde se observa un mapa 3D donde la tercera dimensión representa el número de ensayo.

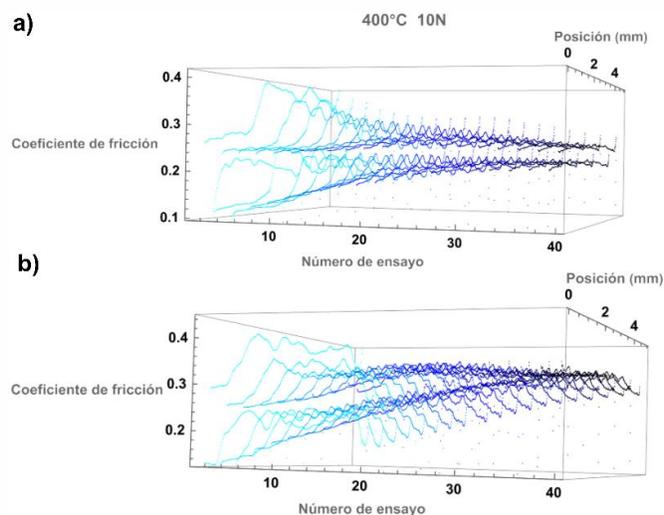


Figura 20. A) Mapa 3D evolución del coeficiente de fricción para el material recocido a 400° bajo una carga de 10 N B) Mapa 3D evolución del coeficiente de fricción para el material recocido a 600° bajo una carga de 10 N

Los saltos en el coeficiente para las curvas individuales pueden deberse a tocar con un elemento microestructural. A lo largo del experimento, estos saltos disminuyen y la curva de ida se acerca a la curva de vuelta, correspondiente a un fenómeno de rodaje. Se puede postular que el comportamiento del coeficiente de fricción presenta una convergencia completa en la mayoría de los casos, como se ilustra en la Figura 20 B.

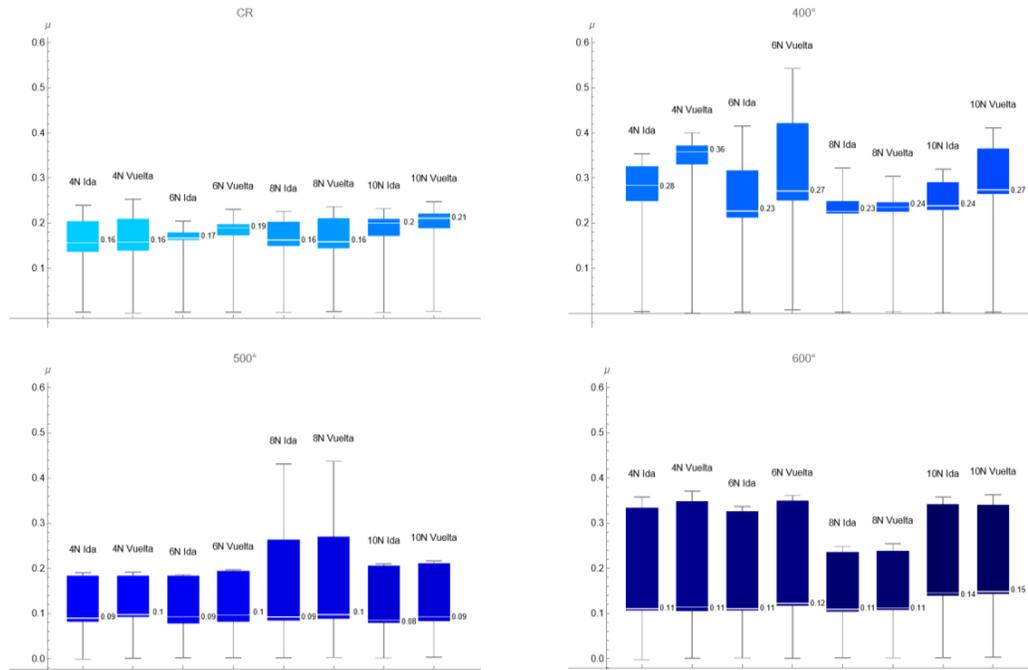


Figura 21. Diagrama de caja y bigotes sobre la distribución estadística de los valores de coeficiente de fricción obtenidos para cada dirección, carga y condición térmica.

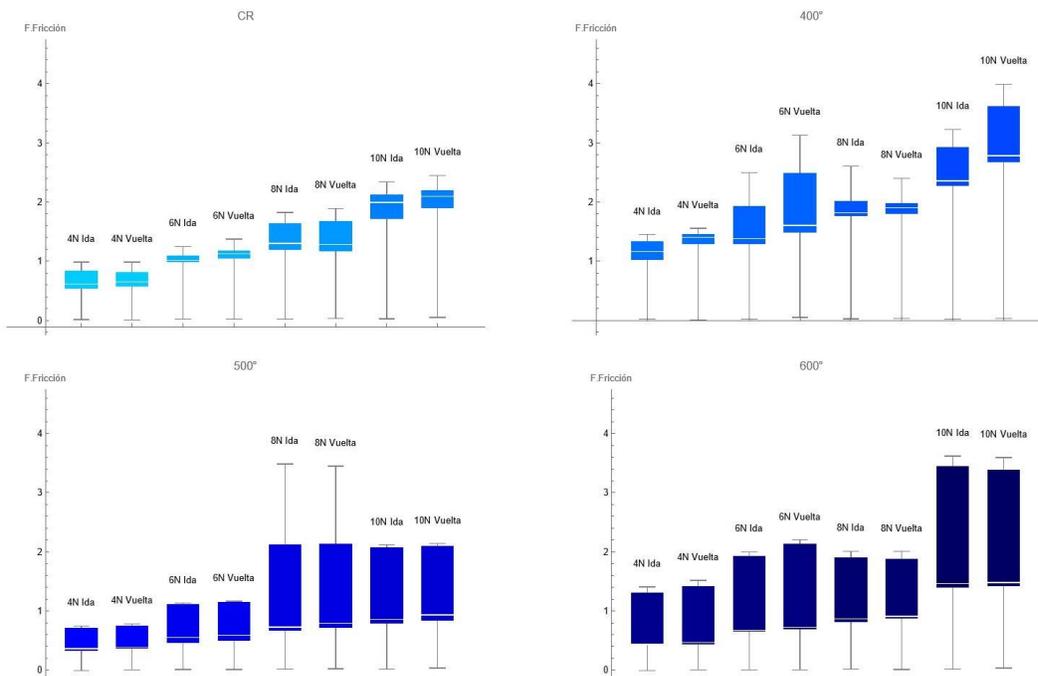


Figura 22. Diagrama de caja y bigotes sobre la fuerza de fricción y su dependencia con la carga para cada dirección, carga y condición térmica.

Se presenta en la Figura 21 el diagrama de caja y bigotes sobre la distribución estadística de los valores de coeficiente de fricción, el cual contempla los datos obtenidos haciendo distinción entre el sentido de ida y el sentido de vuelta dentro del último ensayo recíprocante (En la gráfica se distinguen con I y V). Es decir, se combinan los resultados de los últimos dos ensayos (39 y 40) de ambas repeticiones (Etapa 1 y Etapa 2). En la Figura 21 se observa una gran variación en los datos tanto del material recocido a 400° como del material recocido a 600°. Mientras el material laminado en frío y el material recocido a 500° presentan un comportamiento más estable.

En la Figura 22 se presenta el diagrama de cajas y bigotes sobre la distribución estadística de los valores de la fuerza de fricción, elaborado con las mismas consideraciones que el representado en la Figura 21. En este se observa claramente la dependencia de la magnitud de la fuerza de fricción con respecto a la carga aplicada.

Se realizó el promedio aritmético del coeficiente de fricción para cada temperatura y condición de carga, distinguiendo entre la dirección dentro del ensayo, y finalmente se realiza el promedio global entre ambos valores para obtener la Tabla 8

Tabla 8. Promedio global de los coeficientes de fricción

Tratamiento	4N	6N	8N	10N
CR	0.17	0.18	0.18	0.20
400	0.31	0.30	0.24	0.28
500	0.13	0.13	0.18	0.14
600	0.22	0.22	0.17	0.24

4.3 Desgaste

Perfilometría óptica

En la Figura 23 se observan las ilustraciones correspondientes a la perfilometría óptica de las huellas de desgaste en la sección transversal a la dirección de laminación, debe tenerse cuidado, dado que para CR con carga de 10N y a 400 con carga de 10N, las escalas presentan un máximo diferente, debido a que el material tiene un comportamiento muy diferente comparado con los otros casos.

Asimismo, aunque el máximo es el mismo en el resto, la distribución de la escala de colores es diferente en algunos casos, esto para permitir la visualización de la huella, de no ajustarse simplemente no sería posible ver la huella de desgaste debido a la poca variación que presenta.

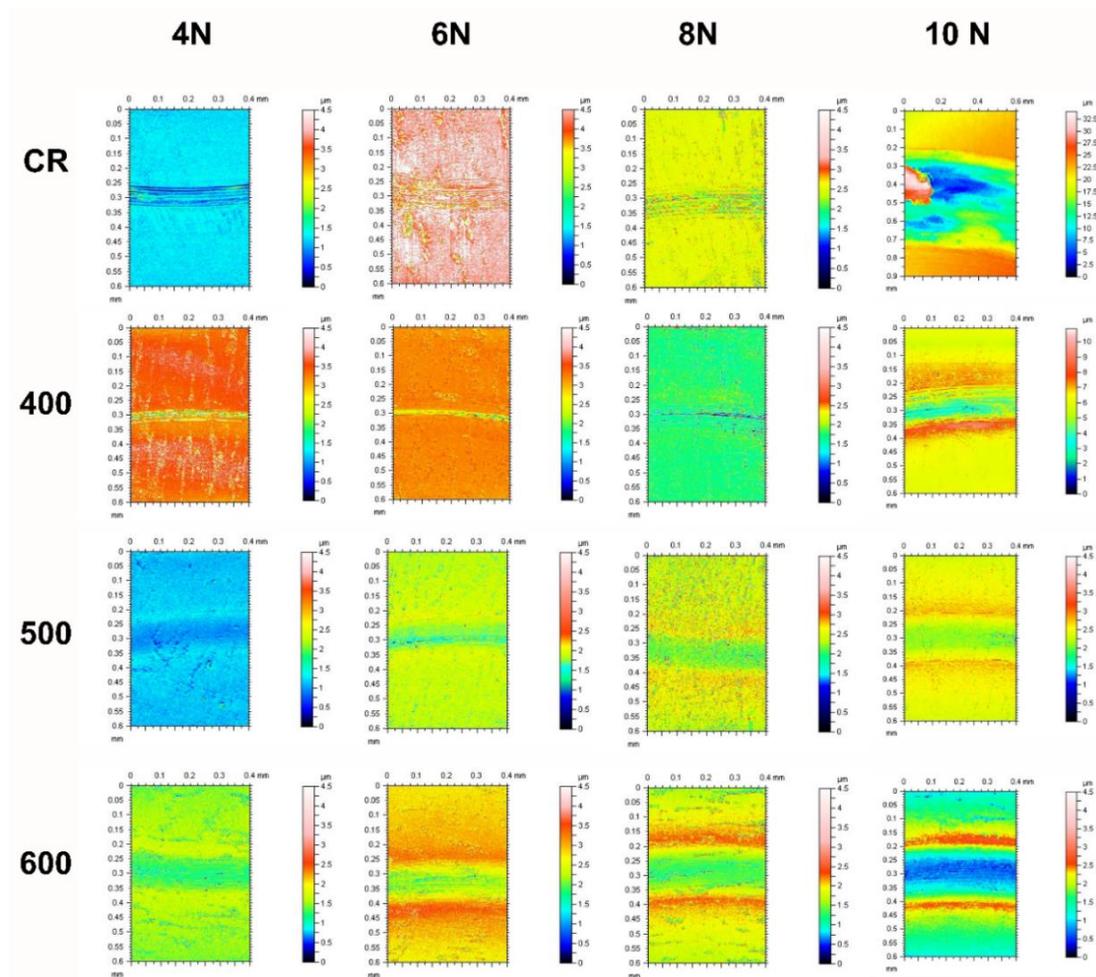


Figura 23. Perfilometría óptica TD (Transversal Direction)

Procedimiento de Análisis de los Mapas de Altura y Perfilometría

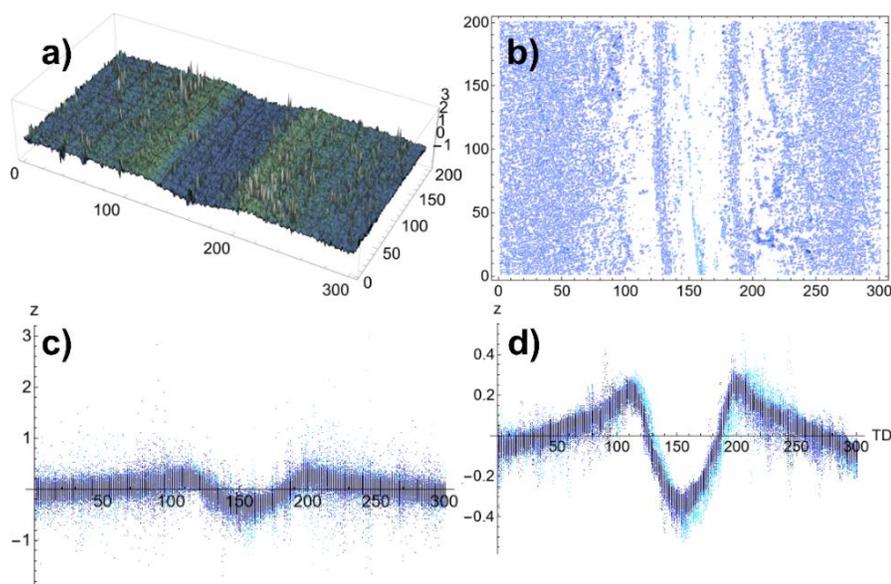


Figura 24. Procedimiento de Análisis de los Mapas de Altura y Perfilometría

Si bien la consola NANOVEA cuenta con una paquetería para el análisis de desgaste, ésta suele aplicar correcciones a la imagen que no siempre son deseables. Para un mejor control del análisis, se importan los datos en Mathematica para su análisis. Un punto importante en el análisis de desgaste es la pérdida de masa o volumen. Se ha visto que, en materiales dúctiles, no siempre hay una pérdida de peso perceptible [23, 61]. En este caso, los procedimientos estándares de una paquetería comercial no siempre arrojan una caracterización correcta del proceso.

En primer lugar, se generaron los mapas de altura con base en la intensidad reportada durante la perfilometría óptica. A partir de estos mapas se extrajeron las coordenadas con su respectiva profundidad, en donde la magnitud de la dimensión de la huella se debe interpretar como el doble de la coordenada correspondiente, debido a la adquisición en pasos de 2 micras. Estos mapas se pueden observar en la Figura 24.

Posteriormente, los datos fueron importados al software Wolfram Mathematica, donde se generó una reconstrucción tridimensional de la superficie en un mapa 3D. En la Figura 24, inciso a, se observa la ilustración de este paso, en esta visualización gráfica se pueden apreciar las variaciones topográficas de la huella de desgaste, resaltan las variaciones de profundidad y se observa la rugosidad de la zona de la huella, así como la zona alrededor de ella.

Posteriormente, se generó una vista en plano de la huella, se observa un ejemplo en la el inciso b de la Figura 24, las áreas en azul se asocian a áreas con menor fluctuación en la profundidad, es por esta razón necesario el capturar no solo la huella, sino el área alrededor de la misma, las áreas más claras indican áreas con variaciones en la profundidad en relación al promedio, ya sean zonas más profundas o áreas con

elevaciones. En este paso se realiza el filtrado con base en la altura, eliminando los valores fuera de rango.

Mas adelante, representado en el inciso c de la Figura 24, se analizó la distribución de puntos en función de la profundidad y del eje perpendicular a la longitud de la huella. La información de profundidad en la dirección paralela a la huella se concentró en función del eje perpendicular, permitiendo visualizar de manera cuantitativa la curvatura de la huella de desgaste.

Finalmente, en el inciso d de la Figura 24, se observa la representación del perfil promedio de la huella con respecto al eje perpendicular a la longitud de la huella. Para obtener esta gráfica se utilizó un filtro de paso bajo para eliminar los picos extremos producto de la variabilidad en la reflexión de la superficie y otros factores no relacionados a la rugosidad, lo cual permitió identificar la magnitud de profundidad y la simetría del perfil resultante.

Comparación de comportamiento

Ensayos en perpendicular a la dirección de laminación

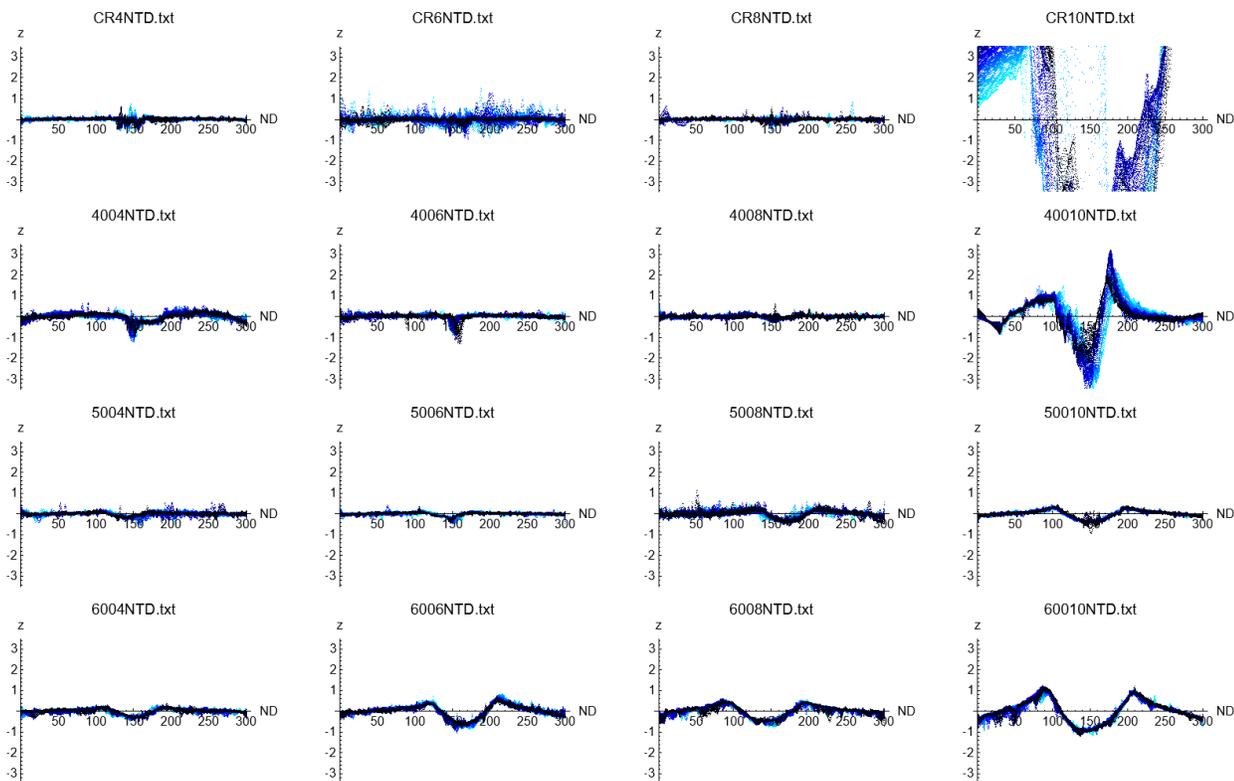


Figura 25. Gráfico comparativo. Profundidad de los ensayos de desgaste TD

La Figura 25 muestra el conjunto de 16 graficas correspondientes a todos los ensayos realizados en dirección perpendicular a la laminación. Las filas representan distintos tratamientos térmicos, dispuestos en el siguiente orden, material laminado en frío, recocido a 400 °C, recocido a 500 °C, recocido a 600 °C. Las columnas corresponden a distintas cargas aplicadas, organizadas de izquierda a derecha, 4N, 6N, 8N y 10N.

Para el material laminado en frío, a 4N se observa que la huella posee una profundidad irregular con un incremento marcado justo al centro de esta. A 6N la huella es igualmente profunda, no se alcanza a observar durante el análisis. A 8N se presenta un caso similar, no se alcanza a distinguir con claridad durante el análisis. A 10N aparece un desgaste con una región central bien definida y una profundidad notablemente mayor, el mayor desgaste presentado en todos los ensayos.

Para el material recocido a 400°C, a 4N se evidencia una huella poco pronunciada con una mayor profundidad al extremo de la huella, a 6N se presenta una variabilidad en la profundidad sin distinguirse la curvatura del perfil, a 8N la huella es apenas distinguible, con una profundidad sumamente baja. A 10N se observa una deformación notoria en comparación a las cargas anteriores, con una tendencia a presentar un relieve elevado hacia el lado derecho.

Para el material recocido a 500 °C y a 600 °C, la profundidad de la huella de desgaste se va incrementando como se incrementan las cargas, se observan perfiles definidos, en todos los casos se alcanza a observar la curvatura bien definida, manteniendo una estructura repetitiva.

De lo anterior se observa que el material laminado en frío presenta el menor desgaste, esto hasta antes de llegar a una carga crítica de 10N en donde el material muestra un desgaste sin comparación. El material recocido a 400°C presenta a cargas altas el mismo comportamiento y muestra deformaciones marcadas. El material recocido a 500 °C presenta el comportamiento más estable, con curvaturas bien definidas pero de poca profundidad. El recocido a 600 °C muestra curvaturas definidas más pronunciadas en la profundidad.

Ensayos en paralelo a la dirección de laminación

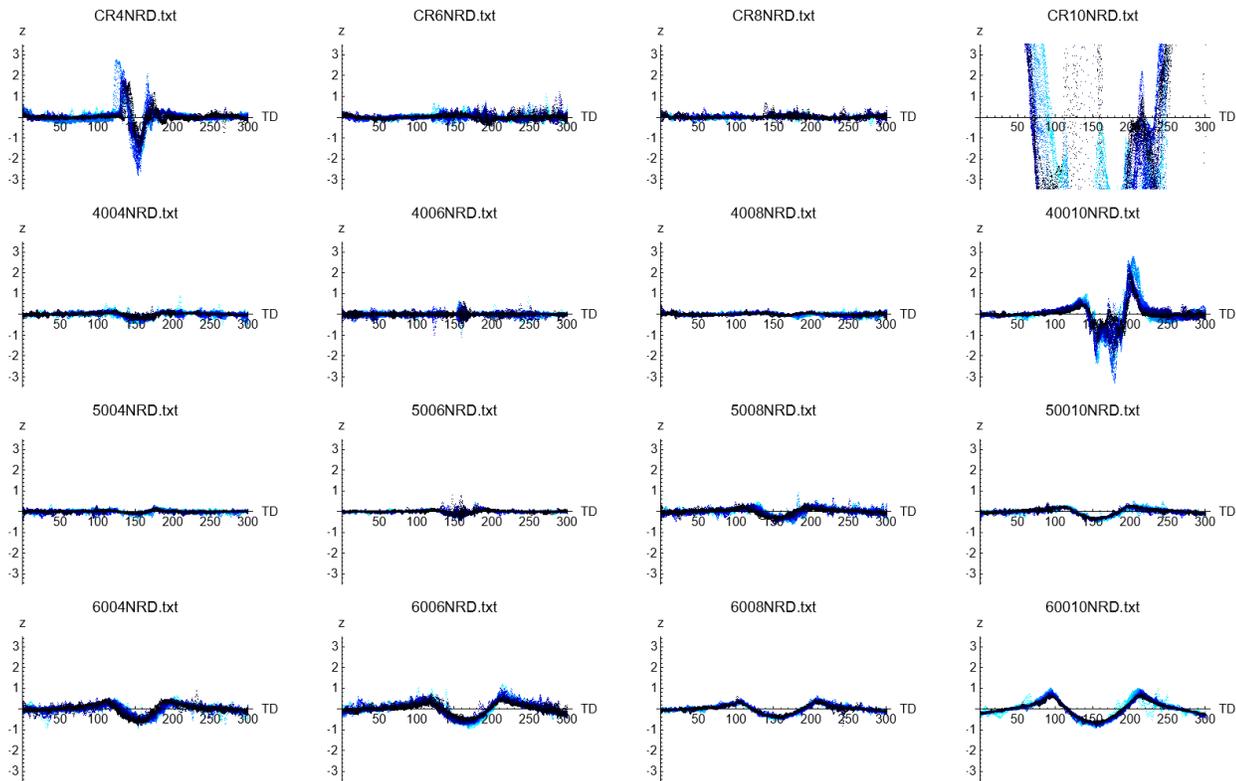


Figura 26. Gráfico comparativo. Profundidad de los ensayos de desgaste RD

El comportamiento general es similar al caso transversal. Algunas diferencias son el comportamiento del material laminado en frío, en donde se observa una profundidad importante en la carga aplicada de 4N. Para el material laminado en frío y el material con recocido a 400°C, existe una mayor variabilidad en su comportamiento.

En general, de ambas gráficas, se observa que el material recocido a 500° presenta la menor variabilidad para las cargas aplicadas. Para este tratamiento, el desgaste en RD (dirección a la laminación) presentan distribuciones homogéneas en términos de profundidad, mientras que en la dirección TD (Transversal a la dirección de laminado) se aprecian alteraciones, en especial picos de mayor altura, TD tiene zonas de acumulación más anchas en comparación a RD (obsérvese la carga de 10N). En general las huellas TD tienen datos de profundidades más marcadas, pero el acumulado de datos se mantiene en un rango similar para ambas direcciones, no existe una diferencia realmente significativa.

Microscopia electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido se considera como una de las herramientas más importantes para el análisis de daño en materiales metálicos. Una primera observación es que las huellas de desgaste son difíciles de encontrar en este equipo. Esto es una indicación que, aún para los casos más severos mostrados en las Figuras 25 y 26, el desgaste es ligero. La perfilometría óptica muestra una fuerte exageración de la altura.

En las imágenes a bajos aumentos, no se observan detalles que permitan distinguir de manera clara entre los diferentes materiales (Figura 27). En el material laminado en frío, a mayores aumentos, se puede encontrar alguna información relativo a los micromecanismos de desgaste involucrados. Estos se asocian al proceso de deformación severa por la formación de la tribocapa [70-73]. Futuras investigaciones de las secciones transversales de la zona desgastada mediante EBSD y TEM pueden aclarar este fenómeno en más detalle. Es importante recordar que el desgaste no se puede analizar mediante observación de la superficie, la información más importante se encuentra en la microestructura [74].

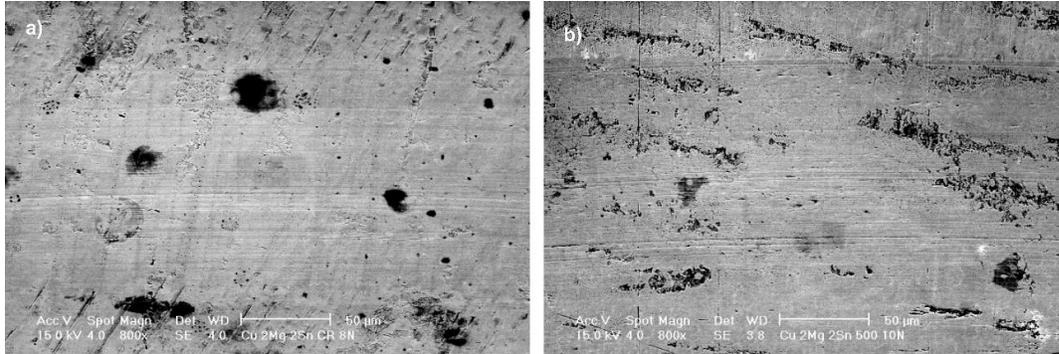


Figura 27. El inciso A muestra la huella del material laminado en frío, el inciso B el material recocido a 500°C. En ambos casos, todo el ancho de la huella es visible, el perfil es muy poco pronunciado. Se ven zonas con surcos paralelos, las partes irregulares corresponden a la fase intermetálica Cu_4MgSn .

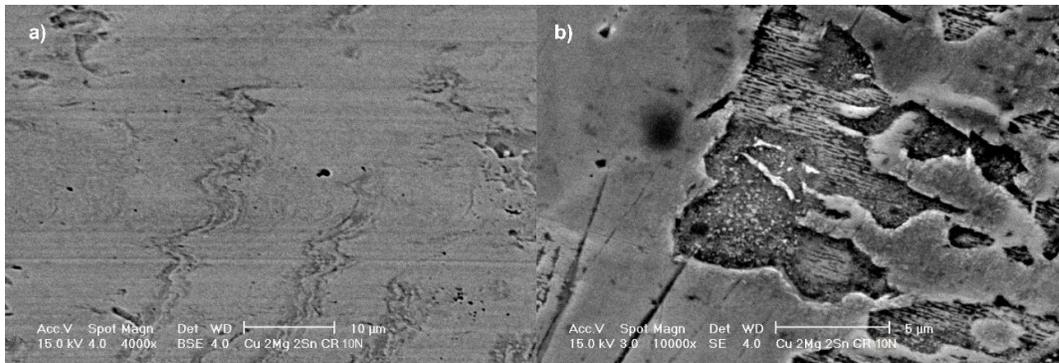


Figura 28. Ejemplos de daño microscópico en el material laminado con carga de 10N. En la imagen izquierda se ve una característica del desgaste deslizante. El material en la superficie fluyó hacia la derecha debida al pasaje repetido del perno, lo que induce deformación plástica severa. En la imagen de la derecha, se ve la fase intermetálica con una nanoestructura inducida por la deformación.

Para el material recocido a 500°C, no se observaron detalles interesantes relativos al mecanismo de desgaste, hasta aumentos del 10000×. Esto corresponde con las huellas relativamente suaves y regulares observados en la perfilometría óptica. Para el material laminado en frío, se ejecutó un análisis adicional en la zona de contacto del perno utilizado en el ensayo, con el objetivo de verificar la presencia de una capa de

transferencia. En la zona principal de contacto, no se detectó la presencia de Cu. En la zona frontal del perno (en dirección del deslizamiento), se encontraron mediante EDS trazas de óxido de cobre, mientras en la parte opuesta, se encontraron partículas de óxido de magnesio.

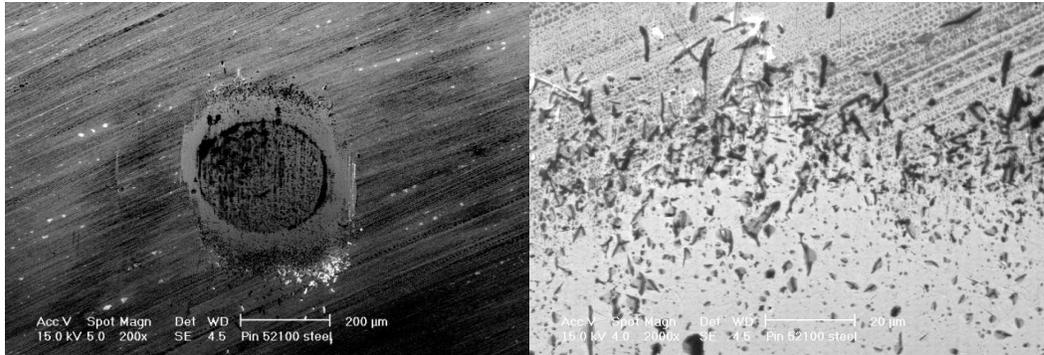


Figura 29. Zona desgastada del perno. Las ralladuras verticales indican la dirección del deslizamiento. Las partículas blancas del lado inferior fueron analizadas como MgO. En la imagen derecha, se observan fragmentos pequeños que contienen Cu. Dado que éstos se observan en tono oscuro en la imagen de electrones retrodispersados también, se concluyó que son óxidos.

5. Discusión

5.1 Diagrama de fases

El punto de partida para la discusión es un diagrama de fases pseudobinario calculado en un estudio anterior [25]. La Figura 30 presenta una sección a través del diagrama Cu-Mg-Sn con cantidades (en peso) iguales de Sn y Mg. Este diagrama se tiene que analizar con referencia a las figuras 11 y 31. En esta última, se muestran las micrográficas de la aleación en estado fundido y parcialmente laminado. Se observa cómo los intermetálicos, que ocupan la zona eutéctica entre las dendritas (solución sólida de Sn y Mg en Cu) se extienden para formar bandas alargadas entre los granos.

La solución sólida es un factor que impide fuertemente la recristalización [75]. Las bandas de partículas intermetálicas impiden que los granos puedan crecer

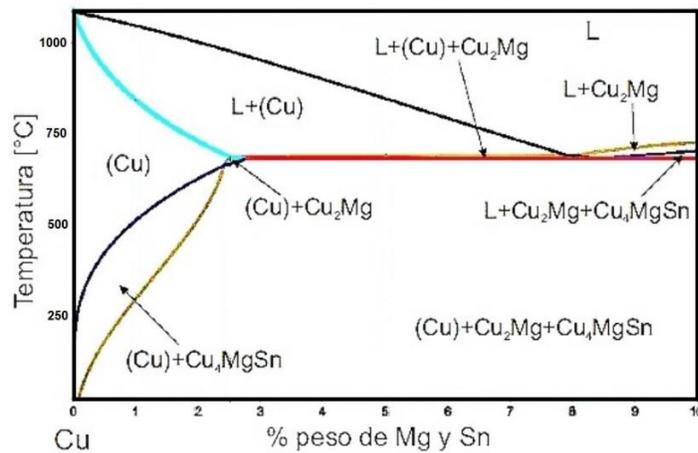


Figura 30. Diagrama de fases pseudobinario CuMgSn (peso), para cantidades iguales (en peso) de Mg y Sn. La composición de interés está en 2%. [25]

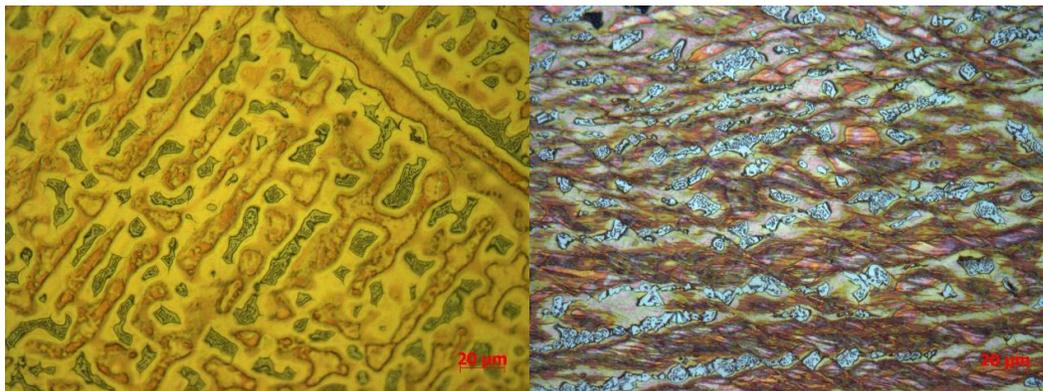


Figura 31. Lado izquierdo: material fundido, con dendritas de la fase α y zonas eutécticas con intermetálicos. Lado derecho: mismo material después de una reducción en frío del 50% (Luz polarizada). Se observa cómo se van redistribuyendo los intermetálicos [24].

De acuerdo al diagrama de fases pseudobinario de la aleación, el magnesio tiene solubilidad limitada en 2.5% porcentaje peso, la baja solubilidad favorece la formación de fases intermetálicas que se observan en la microestructura del material laminado en frío. Por otra parte, en el material con tratamiento a 400°, se observa una recuperación parcial de la estructura, con bandas de granos que conservan su orientación previa, esto indica que no se alcanza la energía suficiente para generar recristalización, la resistencia a la recristalización puede atribuirse en parte a la solución sólida y también a la presencia de partículas intermetálicas. La aleación con recocido a 500° alcanza a recristalizar, sin embargo, el crecimiento de grano está restringido por la dispersión de partículas duras, que impiden la movilidad de los límites de grano. La aleación con tratamiento a 600° presenta la disolución prácticamente completa de las partículas intermetálicas, lo que libera los límites de grano y facilita su crecimiento.

De acuerdo a los principios de metalurgia, los cambios microestructurales están directamente correlacionados con la resistencia y la ductilidad. A medida que el material transita del estado deformado (laminado en frío) al estado recristalizado, la dureza disminuye de manera progresiva y casi lineal. Este comportamiento se explica dada la reducción de la densidad de dislocaciones, en el material laminado en frío la alta densidad de dislocaciones y las fases duras actúan como barreras, pero conforme ocurre la recristalización y se reduce el contenido de partículas, el material adquiere una mayor facilidad de deformación plástica. El fuerte crecimiento de grano explica por qué el material recocido a 600°C tiene la resistencia más baja que a 500°C, si bien ambos están recristalizados por completo.

5.2 Tracción

Los resultados de tracción muestran una correlación entre las características microestructurales y la respuesta mecánica. Tanto el esfuerzo máximo como la tenacidad estuvieron condicionados por variables como el tamaño de grano, la morfología de las fases intermetálicas y el grado de endurecimiento acumulado en cada condición de tratamiento. El material laminado en frío presenta el mayor esfuerzo máximo, lo cual se puede atribuir al endurecimiento por deformación, donde la alta densidad de dislocaciones actúa como barrera a la deformación plástica, esta condición tiene consecuencias en la ductilidad, pues la fractura es frágil y la tenacidad reducida.

Con el tratamiento a 400° se observa una caída en el esfuerzo máximo, sin embargo alcanza a mostrar un comportamiento plástico, a diferencia del material laminado en frío la ruptura no es frágil. El material recocido a 400°, como se muestra en la microestructura, presenta recuperación, sin embargo, conserva características del endurecimiento por trabajo en frío, lo cual explica su baja tenacidad.

El material con recocido a 500°C resulta ser el punto óptimo del compromiso entre resistencia y ductilidad. La microestructura, ya completamente recristalizada con crecimiento de grano limitado, ofrece una configuración favorable según los principios de la metalurgia física: un tamaño de grano fino favorece la resistencia (Ley de Hall-Petch), mientras que la menor densidad de dislocaciones permite una mayor capacidad de deformación antes de la fractura.

Por otra parte, el tratamiento a 600°C, presenta una caída pronunciada en el esfuerzo máximo. Esto queda explicado como consecuencia del crecimiento de grano y la

disminución del área de fronteras de grano. En términos de tenacidad, desde la gráfica comparativa queda claro que es el material más tenaz de todos.

Además de los efectos microestructurales, algunos ensayos no incluidos reflejaron comportamientos anómalos que pueden explicarse por la presencia de defectos internos en las probetas provenientes de la fundición. Algunos de estos defectos se manifiestan como grietas después del laminado. Estos defectos, difíciles de detectar visualmente, actúan como concentradores de esfuerzo lo que provoca la ruptura temprana de la probetas.

5.3 Fricción

Los ensayos revelaron una evolución compleja del coeficiente de fricción en función del tiempo y de la condición de tratamiento térmico. Sin embargo, salvo en condiciones muy específicas, la mayoría de las curvas presentan una fase de transición (rodaje) durante la cual el coeficiente de fricción experimenta un cambio progresivo hasta alcanzar la estabilidad. En la mayoría de las condiciones evaluadas, el coeficiente de fricción converge a un valor promedio relativamente estable, tanto en la ida como en la vuelta del recorrido.

La ley de Amontons establece que la fricción es directamente proporcional a la carga normal e independiente del área de contacto y de la velocidad de deslizamiento. Aunque esta ley asume contactos perfectamente elásticos entre cuerpos rígidos, condición que difícilmente se cumple en materiales reales, en la Figura 22 se comprueba la dependencia con respecto a la carga. Algunas condiciones como el material laminado en frío y el material recocido a 400, presentan una mayor diferencia en la magnitud de la fuerza de fricción entre las diferentes cargas aplicadas, mientras la aleación recocida a 500 presenta un menor incremento entre las cargas. [33]

Si bien en metales blandos o parcialmente recristalizados podría esperarse que el coeficiente de fricción este gobernado por la capacidad del material de fluir plásticamente en la superficie, dado que en estos casos, la deformación en las asperezas es predominantemente plástica [76] . En la Figura 21 queda claro que el coeficiente de fricción no depende de la carga aplicada en la mayoría de los tratamientos térmicos estudiados.

Se encontró que los promedios globales del coeficiente de fricción en la muestra recocida a 500° son constantes (en comparación al resto de las muestras). El material laminado en frío presenta también cierta estabilidad aunque dependiente de la carga, lo cual probablemente se debe a su dureza. En el caso del material recocido a 400° y a 600°, valdría la pena realizar una repetición en las mediciones, sin embargo, como se demostrará en la siguiente sección, no son los tratamientos de mayor interés.

5.4 Desgaste

El análisis del desgaste pone en evidencia una interacción compleja, sin embargo, el conjunto de las imágenes obtenidas por perfilometría junto con su análisis en los perfiles de profundidad, permite establecer la naturaleza del daño superficial inducido por el contacto deslizante, así como determinar el tratamiento con mejor respuesta al desgaste.

Debe de tenerse en cuenta que las imágenes presentadas pueden interpretarse de manera exagerada, lo cual puede inducir interpretaciones erróneas sobre la severidad del desgaste. Sin embargo, al observar la escala y las profundidades las 16 combinaciones de ensayo mostraron en general un comportamiento de desgaste ligero, siendo difícil localizar las huellas en el microscopio electrónico de barrido.

En los ensayos realizados el material laminado en frío respondió favorablemente a cargas moderadas, huellas superficiales de escasa profundidad y difícil detección. No obstante, al incrementar la carga a 10 N, la huella de desgaste se torna profunda, asimétrica y completamente desproporcionada, esto está asociado a una carga crítica. En el material recocido a 400°, las muestras presentaron surcos de mayor definición y cierta irregularidad lateral, semejantes a patrones de arado.

Las huellas de desgaste presentan en los tratamientos térmicos de 500° y 600°, la formación de crestas en los bordes de las huellas, lo que indica que el mecanismo predominante es deformación del material en la superficie, la remoción de material es limitada y el flujo plástico lateral domina la respuesta. El recocido a 500° presentó perfiles de desgaste simétricos, poco profundos y reproducibles. La microestructura alcanzada en este tratamiento permite tener deformación uniforme sin propiciar la remoción de material. Por otro lado, la muestra recocida a 600 °C, mostró perfiles más profundos, con crestas más marcadas, lo que indica una mayor fluencia del material hacia los bordes, resultado esperado dada su ductilidad.

No se ha cuantificado la pérdida volumétrica del material, debido a dos factores. En primer lugar, la diferencia en el comportamiento entre los tratamientos térmicos es evidente y se puede definir la condición óptima de recocido sin cuantificar esta pérdida. En segundo lugar, las pérdidas reales de volumen son mínimas o incluso imposibles de cuantificar con precisión en estos casos, esto es evidente en los casos de laminado en frío y el recocido a 400°, para las cargas de 4N, 6N y 8N, ya que la formación de las crestas compensa la pérdida de volumen en la zona baja de la huella.

Si bien, se podría debatir entre el material laminado en frío y el material con recocido a 500°, pues ambos ofrecen un buen desempeño frente al desgaste a bajas cargas, lo importante sucede una vez se alcanza la carga crítica, en donde el material laminado en frío sufre un súbito incremento de desgaste. Este es suficiente para descartar la selección del material laminado en frío, pues en los cojinetes puede presentarse el caso de la pérdida de la capa lubricante, por tanto, no puede garantizarse que el régimen de operación siempre se encuentre entre las cargas no críticas. En conclusión, la seguridad de operación no podría garantizarse.

Las microscopías, confirman el desgaste ligeramente adhesivo, así como un régimen de desgaste ligero. El perno resultaba de interés, por la posible formación de una capa de transferencia. Sin embargo, el análisis apunta a que en el material laminado en frío a 10N existe desgaste abrasivo y adhesivo, evidenciado con la presencia de cobre y partículas de magnesio sobre el perno.

6. Conclusiones

Se lograron laminar en cantidades suficientes lingotes de la aleación Cu₂Mg₂Sn (peso), obteniendo material para realizar una caracterización definitiva de las características tribológicas de la aleación. Esto permitió evaluar de forma sistemática la relación entre tratamiento térmico, evolución microestructural, dureza y comportamiento frente al desgaste.

El análisis del diagrama de fases, en conjunto con el comportamiento frente a los ensayos de desgaste, permite concluir que a 600 °C se disuelven las partículas intermetálicas presentes en la aleación. Estas partículas limitan el crecimiento del grano y por lo tanto se tiene un cambio drástico de la microestructura. En contraste, a 400 °C se observa un proceso de recuperación del grano, lo que permite conservar una mayor dureza y un comportamiento similar al material laminado en frío.

Los ensayos de microdureza permitieron no solo cuantificar la pérdida de dureza conforme aumenta la temperatura del tratamiento térmico, sino también asociar estos cambios con los que sufre la microestructura. Aún más relevante, los ensayos de microdureza permitieron asociar la influencia de la dureza en la respuesta al desgaste a bajas cargas, los materiales más duros presentaron menor desgaste.

Un aporte relevante es que se identificó una transición crítica en el mecanismo de desgaste, hacia un régimen abrasivo y adhesivo severo, esto para el material laminado en frío y el material recocido a 400°C. Se concluye entonces que para la aleación Cu₂Mg₂Sn (peso) el tratamiento térmico óptimo es un recocido a 500 °C, ya que permite una relación óptima entre dureza y respuesta al desgaste a cargas variables entre 4 y 10 N.

La conclusión del presente trabajo es clara, la aleación con un recocido a 500 °C presenta la mejor combinación entre dureza, tenacidad, coeficiente de fricción y respuesta al desgaste. Sin embargo, para trabajos futuros sobre esta línea, se recomendaría realizar pruebas de desgaste y fricción de mayor duración, enfocadas específicamente a dicho tratamiento.

Para futuras investigaciones se propone utilizar microscopía electrónica de transmisión (TEM) para analizar a profundidad los mecanismos de desgaste, así como tratar de identificar la formación de la tribocapa. Una segunda técnica es la difracción de electrones retrodispersados, que permite la observación de zonas más extensas de la tribocapa que el TEM. Finalmente, valdría la pena realizar un estudio adicional para evaluar el desempeño de la aleación en condiciones reales de servicio, específicamente si la aleación fuese utilizada en la fabricación de cojinetes o para otras aplicaciones cuyas condiciones de operación sean severas.

7. Referencias

1. Rabinowicz, E. (1965). *Friction and wear of materials* (2nd ed.). Wiley.
2. Stachowiak, G. W. (Ed.). (2006). *Wear: Materials, mechanisms and practice*. Wiley.
3. Miyoshi, K. (1998). *Solid lubrication fundamentals and applications: Introduction and background*.
4. Rigney DA, Chen LH, Naylor MGS, Rosenfield AR. Wear processes in sliding systems. *Wear* 1984;100:195–219. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90013-9](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(84)90013-9).
5. Rigney DA. Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials. *Wear* 2000;245:1–9. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00460-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00460-9).
6. Kapoor A, Franklin FJ. Tribological layers and the wear of ductile materials. *Wear* 2000;245:204–15. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00480-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00480-4).
7. Rainforth WM. Microstructural evolution at the worn surface: a comparison of metals and ceramics. *Wear* 2000;245:162–77. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00476-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00476-2).
8. *Tribology of polymers, polymer composites, and polymer nanocomposites*. (2023). In Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01738-X>
9. Schouwenaars, R., Jacobo, V. H., & Ortiz, A. (2007). Microstructural aspects of wear in soft tribological alloys. *Wear*, 263(1–6), 727–735. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.002>
10. Gutiérrez Santillán, A. (2024). *Influencia de los parámetros de procesamiento en el estudio del desempeño tribológico de una aleación base aluminio reforzada con partículas generadas durante una reacción in-situ* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
11. Marzal Álvaro, I. (2023). *Estudio del impacto de la tribología en el ahorro del consumo energético* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio Digital UPCT. <http://hdl.handle.net/10317/12515>
12. National Research Council of Canada, Associate Committee on Tribology. (1986). *A strategy for tribology in Canada: Enhancing reliability and efficiency through the reduction of wear and friction* (Technical Report No. NRCC 26556; NPARC 21272321). National Research Council of Canada. <https://doi.org/10.4224/21272321>
13. OfficialData.org. (n.d.). *US inflation calculator*. Retrieved May 19, 2025, from <https://www.officialdata.org/us/inflation/>
14. Jost H P (ed.). *Lubrication (Tribology)—A report on the present position and industry's needs*. Department of Education and Science, H. M. Stationary Office, London, UK, 1966.
15. Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5(3), 263–284. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
16. Madej, M., Leszczyńska-Madej, B., Hrabia-Wiśnios, J., & Węglowska, A. (2021). Effect of FSP on tribological properties of Grade B89 tin babbitt. *Materials*, 14(10), 2627. <https://doi.org/10.3390/ma14102627>

17. Castillo Herrera, W. P., & Toapanta Cunalata, O. G. (2022). *Principios de tribología aplicados en la ingeniería*. Universidad Central del Ecuador. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/779863.pdf>
18. Mesa Grajales, D. H., & Sinatora, A. (2003). El desgaste de materiales: enfrentarlo o dejarlo de lado y asumir los riesgos. *Scientia et Technica*, 2(22). <https://moodle2.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7427>
19. González, L. (2024, March 26). México se mantiene como el 7° productor mundial de autos. *El Economista*. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Mexico-se-mantiene-como-el-7-productor-mundial-de-autos-20240326-0002.html>
20. Holmberg, K., Kivikytö-Reponen, P., Härkisaari, P., Valtonen, K., & Erdemir, A. (2017). Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 115, Article 10.1016/j.triboint.2017.05.010.
21. Priest, M., & Taylor, C. (2000). Automobile engine tribology—Approaching the surface. *Wear*, 241(2), 193–203. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00375-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00375-6)
22. Liaño Gómez, R. (2016). *Diseño y comportamiento de cojinetes* [Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Cantabria].
23. Figueroa Alcántara, C. G. (2011). *Caracterización de la compatibilidad tribológica en aleaciones dúctiles mediante un ensayo de tribometría coaxial* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
24. Flores Alarcón, J. L. (2015). *Caracterización de una aleación Cu-2%Mg-2%Sn* (Tesis de Ingeniería Mecánica). Universidad Nacional Autónoma de México.
25. Bravo Benard, A. E. (2015). *Síntesis, caracterización y comportamiento tribológico de aleaciones Cu-Mg-Sn* (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México.
26. Linjamaa, A., Lehtovaara, A., Kallio, M., & Léger, A. (2020). Running-in effects on friction of journal bearings under slow sliding speeds. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 234(3), 362–372.
27. Wang, Z.M., Yang, Q., Sun, Z.P., Zhang, B.R., Zhao, W. and Rao, W.F., 2020. The effects of Bi and Pb on the soft phase in Al₈₂Sn₁₅Si₂. 2Cu₀. 8 sliding bearing alloy. *Materials Characterization*, 170, p.110684. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110684>
28. Bravo, A., Schouwenaars, R., & Ortiz, A. (n.d.). *Desarrollo de las técnicas de producción y estudio de la solidificación de las aleaciones Cu-Mg-Sn para aplicaciones tribológicas*.
29. Cottrell, A.H., 2002. Commentary. A brief view of work hardening. In *Dislocations in solids* (Vol. 11, pp. vii-xvii). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1572-4859\(02\)80002-X](https://doi.org/10.1016/S1572-4859(02)80002-X)
30. Krim, J., Solina, D., & Chiarello, R. (1991). Nanotribology of a Kr monolayer: A quartz crystal microbalance study of atomic scale friction. *Physical Review Letters*, 66, 181–184. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.181>
31. Gnecco, E., Bennewitz, R., & Meyer, E. (2002). Nanotribology. *CHIMIA International Journal for Chemistry*, 56(10), 562. <https://doi.org/10.2533/000942902777680126>

32. Tocha, E., Schönherr, H., & Vancso, G. (2006). Quantitative nanotribology by AFM: A novel universal calibration platform. *Langmuir*, 22, 2340–2350. <https://doi.org/10.1021/la052969c>
33. Flores Alarcón, J. L. (2024). *Modelado paramétrico de contacto entre superficies con rugosidad gaussiana: Un análisis estadístico mediante el método de elemento finito* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México]. Universidad Nacional Autónoma de México.
34. Flores Alarcón, J. L., Figueroa, C. G., Jacobo, V. H., Velázquez Villegas, F., & Schouwenaars, R. (2024). Statistical study of the bias and precision for six estimation methods for the fractal dimension of randomly rough surfaces. *Fractal and Fractional*, 8(3), Article 152.
35. Ramírez, M. Á., Figueroa, C. G., Jacobo, V. H., Ortiz, A., & Schouwenaars, R. (2018). Critical analysis of randomly rough surfaces for contact mechanics through statistical simulation. En *Fracture, fatigue and wear* (pp. 500–511). Springer Singapore.
36. Schouwenaars, R., Jacobo, V. H., & Ortiz, A. (2017). The effect of vertical scaling on the estimation of the fractal dimension of randomly rough surfaces. *Applied Surface Science*, 425, 838–846. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.045>
37. Grupo Tecnología Mecánica – Procesos de Fabricación. (2014). *Rugosidad superficial*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata. <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>
38. Analytical model of the evolution of surfaces topography during sliding wear. (2025). *arXiv*. Recuperado 31 de marzo de 2025, de <https://arxiv.org/pdf/2503.22307>
39. Shannon entropy as a characteristic of a rough surface: Why the running-in transient process leads to friction reduction. (s. f.). *ABM Proceedings*. Recuperado 31 de marzo de 2025, de <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/shannon-entropy-as-a-characteristic-of-a-rough-surface-why-the-running-in-transient-process-leads-to-friction-reduction>
40. Caro. (2024, noviembre 19). Surface roughness explained: RA, RQ, RZ, and more. Richconn | Precision CNC Parts Manufacturing | China CNC Machining Manufacturer. <https://richconn.com/surface-roughness/>
41. Miettinen, J., & Vassilev, G. (2012). Thermodynamic re-optimization of the Cu-Mg-Sn system at the Cu-Mg side. *Journal of Mining and Metallurgy*, 48(1), 53–62.
42. Blau, P. J. (2001). The significance and use of the friction coefficient. *Tribology International*, 34(9), 585–591. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(01\)00035-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(01)00035-8)
43. Feeny, B., Guran, A. S., Hinrichs, N., & Popp, K. (1998). A historical review on dry friction and stick-slip phenomena.
44. Popov, V. L. (2020). Principios y aplicaciones de la mecánica de contacto en tribología, fricción y adherencia (J. M. Martín-Martínez, Ed.). *Universitat d'Alacant*.
45. Ludema, K. C. (2001). *Modern tribology handbook. Volume One: Friction*.
46. Gnecco, E., & Meyer, E. (2007). *Fundamentals of friction and wear on the nanoscale*. Springer.

47. Czichos, H. (1978). *Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear*. Elsevier.
48. Stolarsky, T. A. (1990). *Mechanical engineering tribology in machine design*. Butterworth-Heinemann.
49. Bravo, A., Durán, H., & Jacobo, V., Ortiz, A., & Schouwenaars, R. (2013). Towards new formulations for journal bearing alloys. *Wear*, 303(1–2), <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.02.013>
50. Kato, K., & Adachi, K. (2001). Wear mechanisms. En B. Bhushan (Ed.), *Modern tribology handbook* (Vol. 1). CRC Press.
51. Ludema, K. (2004). *ASTM Metals Handbook. Volume 18: Introduction to wear*. ASTM International.
52. Ludema, K. C. (1996). *Friction, wear, lubrication: A textbook in tribology*. CRC Press LLC.
53. Martinez, D., Bravo, A., Jacobo, V., Ortiz, A., & Schouwenaars, R. (2013). Recrystallisation of cold rolled CuMgSn alloys produced from thin cast slabs. En *The 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing* (pp. 2607–2614).
54. Rabinowicz, E. (1971). Determination of compatibility through static friction tests. *ASLE Transactions*, 14(3), 198–205. <https://doi.org/10.1080/05698197108972081>
55. Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2006). Adhesion and adhesive wear. En G. W. Stachowiak & A. W. Batchelor (Eds.), *Engineering Tribology* (3.^a ed., pp. 553–572). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075067836-0/50013-4>
56. Fabián, D. H. M. G. O., & Echeverri, H. C. E. A. A. (s. f.). Conceptos generales sobre el desgaste de materiales. *Fundamentos de Tribología*, 141.
57. Schouwenaars, R., & Ortiz Prado, A. (2002). Accelerated wear in babbitt-coated journal bearings in internal combustion engines converted to LPG. *Materials Performance*, 41(12), 32–37.
58. Aghababaei, R., Warner, D. H., & Molinari, J. (2017). On the debris-level origins of adhesive wear. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(30), 7935–7940. <https://doi.org/10.1073/pnas.1700904114>
59. Popov, V. (2019). Generalized Archard law of wear based on Rabinowicz criterion of wear particle formation. *Facta Universitatis: Series Mechanical Engineering*, 17(1), 39. <https://doi.org/10.22190/FUME190112007P>
60. Delaney, B., Wang, Q., Aggarwal, V., Chen, W., & Evans, R. D. (2025). A contemporary review and data-driven evaluation of Archard-type wear laws. *Applied Mechanics Reviews*, 1–31. <https://doi.org/10.1115/1.4068297>
61. Schouwenaars, R., Jacobo, V. H., & Ortiz, A. (2009). Transition from normal to severe wear in PCD during high-speed cutting of a ductile material. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27(2), 403–408. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.01.009>
62. Figueroa, C. G., Schouwenaars, R., Petrov, R., & Kestens, L. (2022). Effect of heat treatment on friction and tribolayer formation in copper. *Tribology International*, 175, Article 107867. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107867>
63. Figueroa, C. G., Garcia-Castillo, F. N., Jacobo, V. H., Cortés-Pérez, J., & Schouwenaars, R. (2017, mayo). Microstructural and superficial modification

- in a Cu-Al-Be shape memory alloy due to superficial severe plastic deformation under sliding wear conditions. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 194, No. 1, p. 012011).
64. ResearchGate. (n.d.). What are the limitations of the Archard wear equation? Recuperado 31 de marzo de 2025, de [https://www.researchgate.net/post/What are the limitations of Archard wear equation](https://www.researchgate.net/post/What_are_the_limitations_of_Archard_wear_equation)
 65. ResearchGate. (n.d.). Generalized Archard law of wear based on Rabinowicz criterion of wear particle formation [PDF]. Recuperado 31 de marzo de 2025, de https://www.researchgate.net/publication/332131247_Generalized_Archard_law_of_wear_based_on_Rabinowicz_criterion_of_wear_particle_formation
 66. Zhai, W., Bai, L., Zhou, R., Fan, X., Kang, G., Liu, Y., & Zhou, K. (2021). Recent progress on wear-resistant materials: Designs, properties, and applications.
 67. Hugo Alberto Durán Cortes: Efecto de los procesos termomecánicos en las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Sn para aplicaciones tribológicas. Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, 19-03-2013.
 68. Schouwenaars, R., Torres, J.A., Jacobo, V.H. and Ortiz, A., 2007, February. Tailoring the mechanical properties of Al-Sn-alloys for tribological applications. In *Materials science forum* (Vol. 539, pp. 317-322). Trans Tech Publications Ltd.
 69. ASTM E3-11, Standard guide for preparation of metallographic specimens, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA (2017).
 70. Rigney DA. Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials. *Wear* 2000;245:1–9. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00460-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00460-9).
 71. Kapoor A, Franklin FJ. Tribological layers and the wear of ductile materials. *Wear* 2000;245:204–15. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00480-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00480-4).
 72. Rainforth WM. Microstructural evolution at the worn surface: a comparison of metals and ceramics. *Wear* 2000;245:162–77. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00476-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00476-2).
 73. Figueroa, C.G., Schouwenaars, R., Cortés-Pérez, J., Petrov, R. and Kestens, L., 2018. Ultrafine gradient microstructure induced by severe plastic deformation under sliding contact conditions in copper. *Materials Characterization*, 138, pp.263-273.
 74. Schouwenaars, R., Jacobo, V.H. and Ortiz, A., 2007. Microstructural aspects of wear in soft tribological alloys. *Wear*, 263(1-6), pp.727-735.
 75. Rollett, A., Humphreys, F.J., Rohrer, G.S. and Hatherly, M., 2004. *Recrystallization and related annealing phenomena*. elsevier.
 76. Bowden, F., Tabor, D. Mechanism Of Metallic Friction. *Nature* **150**, 197–199 (1942). <https://doi.org/10.1038/150197a0>