



Protección al arranque en seco de sistemas lubricados utilizando recubrimientos autolubrificantes depositados por pulverización catódica en combinación con lubricantes comerciales

Protection against cold starts in lubricated systems using self-lubricating coatings deposited by cathodic pulverization in combination with commercial lubricants

Recibido 03-07-2012. Aprobado 05-10-2012

JUAN MANUEL GONZÁLEZ CARMONA¹,
CAROLINA ORTEGA PORTILLA²,
CÉSAR ANDRÉS AMAYA HOYO S³,
RALF HROSS⁴,
FRANCISCO BLAN DÓN⁵,
JORGE CABAL LARRARTE⁶,
JORGE ENRIQUE MORALES⁷,
FEDERICO SEQUEDA⁸

Resumen

El arranque en frío de sistemas lubricados genera un gran desgaste debido a la falla de la película lubricante, lo cual produce contacto entre las superficies y origina partículas abrasivas que hacen del desgaste un proceso acumulativo. Esto causa problemas por paradas inesperadas, cambio en calendarios de mantenimiento y pérdida de tiempo, dinero y energía. Con el fin de proteger las piezas industriales durante el arranque en frío y cuando se presenta una falla de la película lubricante, considerada esta como una transición de lubricación mixta a lubricación por capa límite, se realizó un estudio del comportamiento de los lubricantes sólidos aplicados sobre superficies de acero inoxidable AISI 304, recubiertas con bicapas de bisulfuro de tungsteno/titanio (WS_2/Ti) en ambientes sin lubricación y en ambientes lubricados con diversos fluidos utilizados en la industria de reductores, rodamientos y elementos hidráulicos. Utilizando diferentes técnicas de análisis, se determinaron la estructura cristalina, las propiedades superficiales, las mecánicas y las tribológicas en seco y con los lubricantes comerciales SHELL OMALA S4GX-220 y TELLUS S4ME-46, proporcionados por la compañía UMACO & CIA SAS se determinó que las propiedades básicas del recubrimiento influyen su comportamiento tribológico, con una reducción del coeficiente de fricción y el desgaste con respecto a las pruebas en seco y al sustrato utilizado, y que la formación de partículas abrasivas inducen una reducción en la resistencia al rayado en seco y *scuffing/scoring* en sistemas lubricados.

Palabras clave: Ahorro energético, lubricación sólida, lubricación de capa límite, capas delgadas, tribología.

Abstract

Cold starting lubricated systems generates severe wear due to failure of the lubricant film, generating contact between surfaces and the production of abrasive particles that make wear a cumulative process. This creates problems due to unexpected halts, changes in maintenance calendars and loss of time, money and energy. In order to protect in-

1. Candidato a Doctor en Ingeniería, énfasis en materiales, Universidad del Valle. juanmgonzalezc@gmail.com.
2. Ingeniera de Materiales, Universidad del Valle. carolinaortega35@gmail.com
3. Ms.C en Ingeniería de Materiales. Profesional 06 laboratorio de recubrimientos duros, Centro ASTIN – SENA Regional Valle. c_amaya@misena.edu.co
4. Ms.C. Electrical Engineering. Gerente UMACO & CIASAS. rhross@umacosa.com
5. Ingeniero Mecánico, Asesor Técnico comercial UMACO & CIA SAS, pachob10@hotmail.com
6. Administrador de Empresas, Asesor Técnico Comercial UMACO & CIA SAS, cabaljorge99@hotmail.com
7. Ingeniero Industrial, Asesor Técnico Comercial UMACO & CIASAS, tecnico@umacosa.com
8. PhD. Profesor titular, Director RDAI, Universidad del Valle. fsequeda@yahoo.com

dustrial parts during cold starting and when there is a failure of the lubrication film considering it as a transition from joint lubrication to lubrication by layer limit, a study was conducted on the behaviour of solid lubricants applied on surfaces of AISI 304 stainless steel coated with Tungsten/Titanium disulfide (WS₂/Ti) bilayers in environments without lubrication and in environments lubricated with different fluids used in the industry of gearboxes, bearings and hydraulic elements. Using different analysis techniques, the dry Crystal structure, surface, mechanical and tribological properties and with commercial lubricant SHELL OMALA S4GX - 220 and TELLUS S4ME-46, supplied by UMACO & CIA SAS were determined. It was also determined that the basic properties of the coating influence their tribological behavior, with a reduction of the friction and wear coefficient with respect to the dry tests and to the substrate used; it was also determined that the formation of abrasive particles induce reduced resistance to scratching in dry tests and scuffing/scoring in lubricated systems.

Keywords: Energy savings, solid lubrication, lubrication layer limit, thin layers, tribology.

Introducción

Desde los inicios de la era industrial, los lubricantes se han convertido en un insumo de vital importancia al disminuir los daños por desgaste y proteger los componentes de una máquina en una línea de producción, gracias a lo cual se reducen costos por uso y mantenimiento de

máquinas y herramientas. En cualquier tipo de industria dedicada a la transformación de una materia prima en un producto útil, una adecuada gestión de la lubricación influye directamente en la productividad y por ende requiere de un acompañamiento técnico especializado, dado, que su aplicación es concreta y característica de cada proceso.

El conocimiento profundo en las áreas de tribología y lubricación se ha convertido en un asunto propio de la investigación, el desarrollo y la innovación (I+D+I) en todos los sectores de la industria mundial ya que este permite disminuir los daños por desgaste y corrosión de las piezas que se encuentran dentro de una máquina. Es un hecho que el adecuado manejo de los fenómenos de desgaste proporciona un uso eficiente de la energía en los procesos productivos. Durante el continuo trabajo de mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo, se ha identificado –según información recopilada del Centro de Documentación de Lubricación de la empresa UMACO & CIA SAS¹–, una interacción con el área metalúrgica en más del 60% del total de los casos de asesoría técnica atendidos, lo cual es un claro indicador acerca de la necesidad de llevar paralelamente conocimientos en materiales, tribología y lubricación a este sector industrial y ha fomentado la formación de grupos interdisciplinarios (universidades-Estado-industria), los cuales proporcionan las capacidades necesarias para adelantar la gestión tecnológica en las áreas de la tribología y la corrosión, y determinan de manera general y concreta su relación con la eficiencia en el uso de energía en la industria, desarrollan funciones específicas y aportan con ello información en áreas claves del objeto de estudio. Ac-

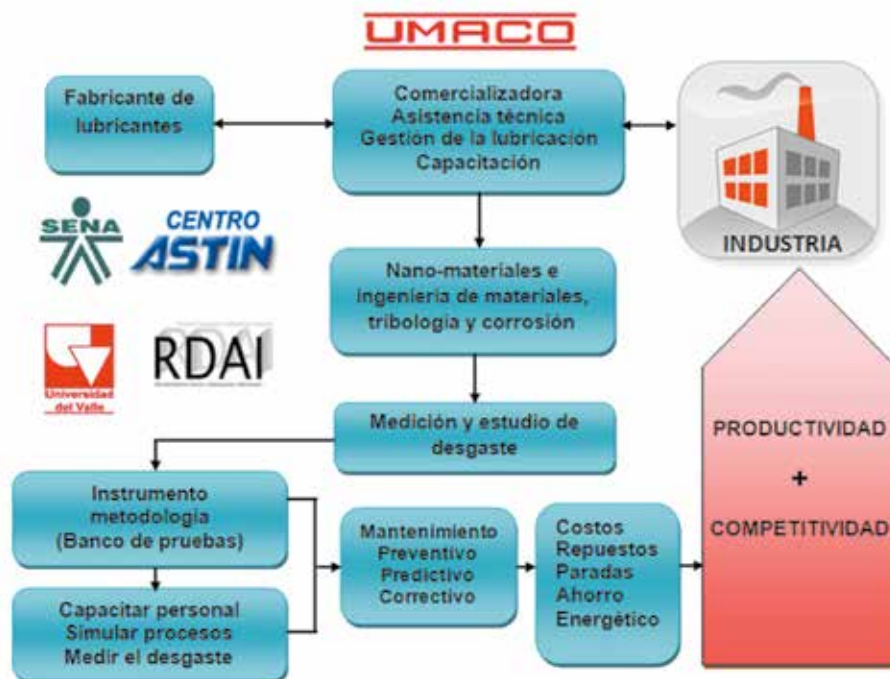


Figura 1. Esquema de trabajo propuesto entre UMACO y CIA SAS, Centro ASTIN-SENA y RDAI-Univalle.

tualmente uno de estos grupos interdisciplinarios que le está apostando a la articulación entre la academia, el Estado y la industria en el área de la tribología y la lubricación a través de la gestión y la innovación, es el conformado por la empresa UMACO & CIA SAS, el Centro ASTIN del Sena y el laboratorio de recubrimientos duros y aplicaciones industriales (RDAI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle.

Esta alianza, en una mesa temática de experiencia y conocimientos entre la lubricación y los nuevos materiales, se articula con los conceptos de innovación y desarrollo tecnológico al influenciar directamente el incremento de la productividad y la competitividad de las empresas al proponer nuevas metodologías y herramientas tecnológicas con el fin de hacerle frente al problema del desgaste en la industria y la protección del medio ambiente (cuando se prolonga la vida útil de un lubricante, que es uno de los objetivos de los lubricantes sintéticos cuya vida útil es aproximadamente cinco veces la de un lubricante mineral). En la Figura 1 se revela el esquema de trabajo propuesto entre las tres instituciones y se observa la articulación de las diferentes fortalezas con que cuenta cada actor en torno a la generación de una metodología y el cumplimiento de metas que arrojen como resultado el incremento en la productividad y competitividad de las industrias, a través de un mejor aprovechamiento de su recurso humano por medio de las capacitaciones que se les pueda suministrar.

Dentro de las actividades de dicha cooperación, se estudiaron capas delgadas de bisulfuro de tungsteno/titanio (WS₂/Ti) en ambientes con lubricantes comerciales y sin ellos, utilizados habitualmente en la industria por los clientes de UMACO y CIA SAS en el sector metalmecánico.

Metodología experimental

La deposición de los recubrimientos se realizó por medio de la técnica de Magnetron Sputtering DC no reactivo, en un equipo marca AJA International ATC 1500 usando un blanco de bisulfuro de tungsteno (WS₂) de 99,9% de pureza y un blanco de titanio (Ti) con un 99,99% de pureza, comprado de manera comercial en la compañía PLASMATERIALS. Las condiciones del sistema de deposición se describen en la Tabla 1.

Utilizando difracción de rayos X (XRD)-Bruker D8 AXS, microscopia electrónica (SEM)-JEOL modelo JSM-6480 LV y espectroscopia de energía dispersada (EDS)-OXFORD INSTRUMENT INCA se determinaron la estructura cristalina del recubrimiento, la morfología y los elementos químicos presentes en la superficie respectivamente. Con un perfilómetro AMBIOS XP-2 se establecieron el espesor y la rugosidad. Mediante nanoindentación se definió la dureza, el módulo de elasticidad y la resistencia a la deformación plástica y se utilizó rayado dinámico (carga de 0 a 35 N) y estático (carga constante de 5 N) para determinar la adhesión y la resistencia al rayado. En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos.

Para observar el comportamiento tribológico se realizaron pruebas de bola sobre disco (BOD) en un tribómetro CSEM instruments, utilizando las condiciones mostradas en la Tabla 3, con el fin de observar si los recubrimientos mejoran el comportamiento del material base cuando la lubricación hidrodinámica falla y se presenta la lubricación mixta y de capa límite. Con este fin, se utilizaron lubricantes tales como SHELL OMALA S4GX-220 y SHELL TELLUS S4ME-46, suministrados por la empresa UMACO & CIA SAS.

Tabla 1. Parámetros de deposición de las películas WS₂/Ti

Blanco	Espesor (nm)	Densidad de potencia (W/cm ²)	Voltaje Bias V _b (V)	Flujo de Ar (SCCM)	Presión de trabajo (mTorr)
Ti	398 ± 21	5	-100	10	3
WS ₂	380 ± 19	2.5			

Tabla 2. Propiedades superficiales y mecánicas del sustrato y los recubrimientos de WS₂/Ti

Material	Rugosidad (nm)	Espesor total (nm)	Dureza H (GPa)	Módulo de elasticidad E (GPa)	Resistencia a la def plástica (GPa) x10 ⁻⁴	Carga crítica L _c (N)
Acero 304	54,41±22,86	---	5,64±0,28	243,48±12,17	30,26±1,51	---
WS ₂ /Ti	39,7±9,58	794,5±22	6,83±0,55	121,03±10,45	210,05±6,12	32,3

Tabla 3. Condiciones del ensayo bola sobre disco.

	Seco	Mojado
Contrapar	Acero 440	Acero 440
Velocidad (cm/s)	5	5
Distancia (ciclos)	3000	50.000
Distancia lineal (m)	~100	~1000
Humedad relativa (%)	38	38
Temperatura (°C)	18	18
Carga (N)	5	5
Volumen de lubricante (ml)	Ninguno	70

El lubricante de la serie OMALA S4GX-220 es empleado en turbinas eólicas e instalaciones de difícil acceso y es particularmente recomendado para los sistemas en los que se exige una vida útil prolongada o cuyo mantenimiento es poco frecuente. De igual forma, se utiliza en sistemas de engranajes cerrados de uso industrial que operan en condiciones rigurosas, como grandes cargas o amplios rangos de temperatura con grandes variaciones (guía de la Shell). Es ideal para ser combinado con un lubricante sólido, como el WS_2 . Por otro lado, el lubricante TELLUS S4ME-46 es requerido en sistemas hidráulicos industriales en los que el uso de la potencia hidráulica es muy intenso, tales como operaciones de moldeado por inyección y de estampado en metales en los cuales se necesita que el aceite tenga una larga vida útil y sea resistente a altas temperaturas. También es adecuado para ciertos sistemas de transmisión de potencia y aplicaciones marítimas que usan fluidos hidráulicos (Shell Tellus S4 ME).

Resultados

En la Figura 2 se observa el patrón de difracción de rayos X obtenido para los recubrimientos y la morfología superficial. El material tiene estructura hexagonal que se caracteriza por una baja resistencia a los esfuerzos cortantes, lo que hace que la fricción se vea reducida. La morfología es homogénea y continua lo que asegura una protección en toda la superficie de la pieza.

En la Figura 3 se muestran los coeficientes de fricción para las pruebas realizadas en seco (Figura 3a) y con lubricantes (Figura 3b). Se puede observar una reducción evidente del coeficiente de fricción cuando se utilizan los recubrimientos de WS_2 . Los resultados obtenidos para el sustrato utilizado muestran las etapas típicas del desgaste de piezas industriales, con una etapa inicial de rompimiento de asperezas seguida de una etapa de asentamiento (Zumgahr, 1987). Las pruebas de fricción en seco muestran un coeficiente de fricción promedio del recubrimiento de 0,083 y su falla se presenta alrededor de los 2.400 ciclos, lo cual muestra una importante reducción del coeficiente de fricción en una ventana razonable de trabajo para elementos no lubricados, y en el momento de una transición momentánea de lubricación mixta a lubricación de capa límite, el recubrimiento puede sostener un bajo coeficiente de fricción hasta la recuperación de las condiciones adecuadas de lubricación.

De manera similar a las pruebas en seco, el acero en las pruebas con lubricantes muestra las etapas de remoción de asperezas con un estado de asentamiento constante. Sin embargo, se observa una reducción evidente del coeficiente de fricción con respecto a las pruebas realizadas en seco, con valores máximos después del asentamiento de 0,23. Los coeficientes más bajos se obtuvieron cuando se combinaron los lubricantes sólidos y líquidos de la serie Tellus, los cuales son similares a los obtenidos

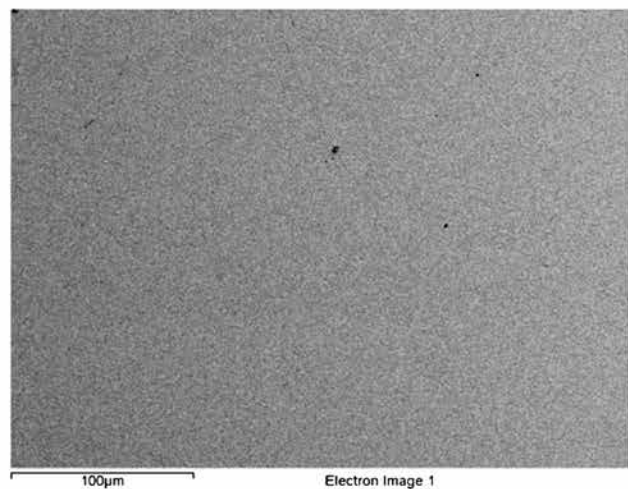
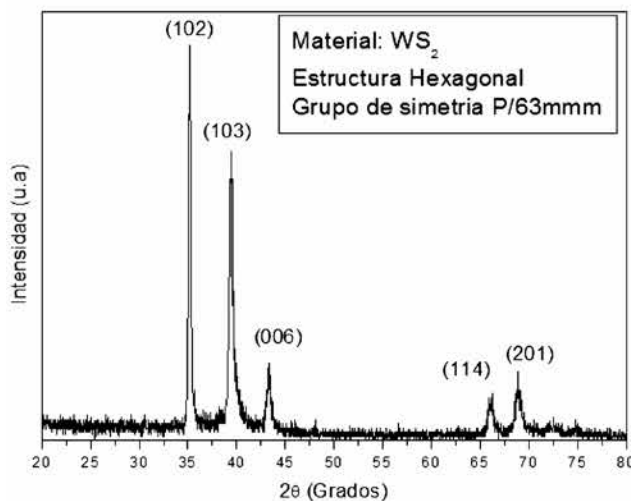


Figura 2 Patrón de difracción y morfología superficial de los recubrimientos.

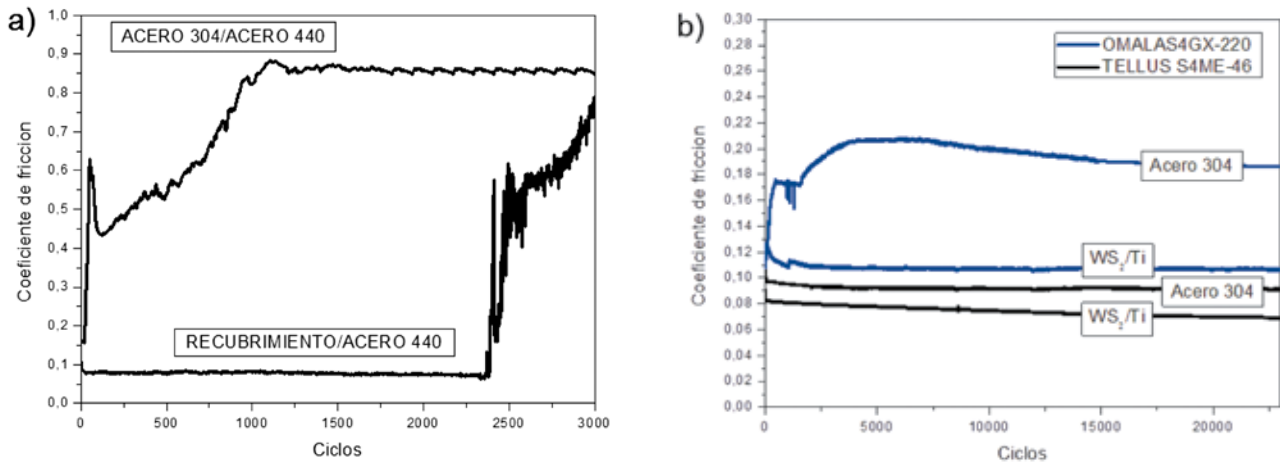


Figura 3. Coeficientes de fricción obtenidos por medio de bola en disco: a) pruebas en seco; b) pruebas con lubricantes.

nidos para las superficies recubiertas en seco, pero sostenidos durante toda la prueba (~50.000 ciclos o ~1 km).

En la Figura 4 (a, b y c) se observan las micrografías SEM de la superficie del sustrato y los recubrimientos desgastados después de realizadas las pruebas en seco. La pista de desgaste del par acero/acero, muestra signos de rayado severo y acumulación de material de la bola en la superficie. Esto se debe a que las propiedades mecánicas de los dos materiales en contacto son similares y por lo tanto hay una alta probabilidad de encontrar adhesión en ambos cuerpos (Zumgahr, 1987).

En la huella se observa la ausencia de rayado con alta adhesión, lo cual produce el bajo coeficiente de fricción.

En la Figura 4b se observan en detalle las partículas del recubrimiento adheridas a la superficie de la huella que protegen el sustrato aun después de alcanzar la distancia de asentamiento para el par acero/acero, lo cual reduce el desgaste por rayado.

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos a partir del análisis EDS realizado en las zonas mostradas en la Figura 4a. El espectro 1 fue tomado sobre la superficie del material y es utilizado como control. Dentro de la huella existen pequeñas zonas donde los elementos del recubrimiento (W, S y Ti) no se encuentran presentes, lo que implica una falla del recubrimiento con aumento del coeficiente de fricción.

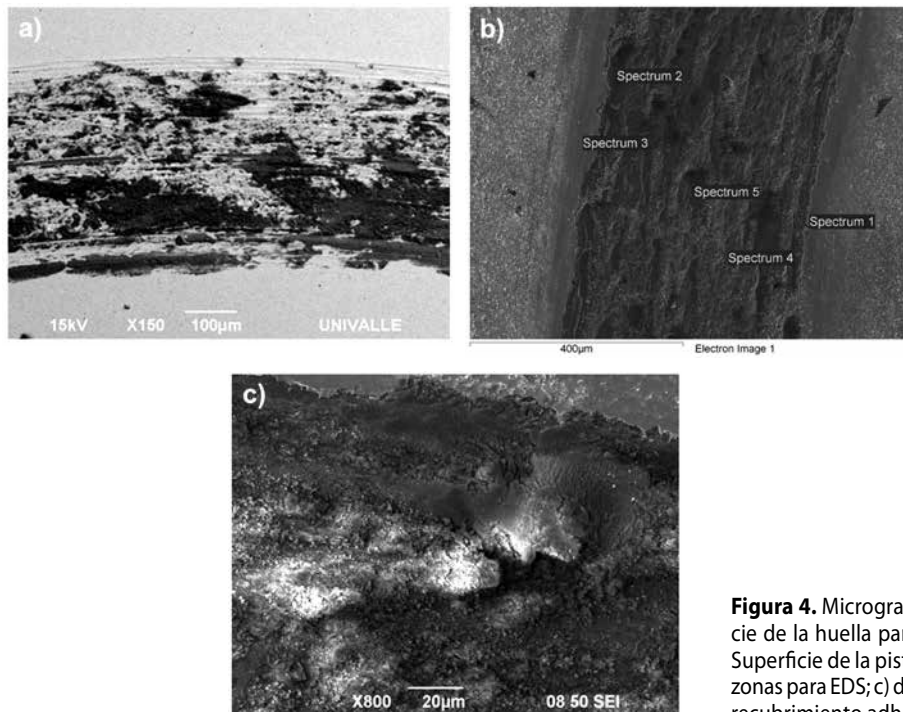


Figura 4. Micrografías SEM de la superficie de la huella para pruebas en seco: a) Superficie de la pista para el acero 304; b) zonas para EDS; c) detalle de partículas del recubrimiento adheridas.

Tabla 4. Porcentaje en peso de elementos obtenidos por EDS en pruebas en seco.

Elemento	W	S	Ti	Cr	Fe	Ni	O	Total
Spectrum 1	88.61	7.39			1.65		2.35	100.00
Spectrum 2	3.85	0.65	10.76	8.49	28.53	3.31	44.42	100.00
Spectrum 3	89.39	6.65			1.44		2.52	100.00
Spectrum 4				15.44	53.25	5.40	25.91	100.00
Spectrum 5	3.81	1.40	1.04	9.80	35.30	3.94	44.72	100.00

Sin embargo, en las demás zonas observadas dentro de la pista se advierten los elementos del material del recubrimiento, lo cual indica una protección parcial del sustrato, incluso después de alcanzar la etapa de asentamiento para el acero. En la Figura 5 se ven micrografías SEM de la superficie desgastada del sustrato y los recubrimientos para los diferentes lubricantes utilizados. La reducción en el ancho y en los defectos de la huella de desgaste es evidente, aunque hay algunas zonas de rayado para los recubrimientos probados con el lubricante serie Tellus. A pesar de esto, no se ve un cambio aparente en el coeficiente de fricción obtenido por bola en disco, lo cual indica una buena resistencia al *scuffing* (rayado sucesivo de la superficie) y al *scoring* (generación de partículas que producen rayado y arado), (Holmberg, 2001).

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran un recubrimiento con una estructura cristalina hexagonal típica de los compuestos que poseen baja resistencia a los esfuerzos de corte. Muestra excelente calidad superficial y adhesión, caracte-

rísticas ideales de un lubricante sólido; con óptima protección superficial, deformación plástica, bajo coeficiente de fricción, resistencia al rayado, generación de tribopelícula y duración superior a los 2.000 ciclos en ambientes secos, y superior a los 50.000 en ambientes lubricados. Ello lo ubica en la zona de aplicación en reductores, rodamientos y elementos hidráulicos lubricados con el fin de proteger de arranques en frío y por fallas en la película lubricante, y sí mejorar el comportamiento de la maquinaria industrial en el momento en que la lubricación límite se presente. Los resultados obtenidos en el presente estudio permitirán a industrias como UMACO & CIASAS, establecer de primera mano las propiedades básicas de los lubricantes utilizados por sus clientes e incursionar en tecnologías como los lubricantes sólidos, con el fin de ofrecerlos en el futuro como solución a los problemas del sector industrial.

Referencias

- Guía de producto SHELL: [en Línea].
http://www-static.shell.com/static/irl/downloads/shell_for_businesses/shell_omala_brochure.pdf
- HOLMBERG, Kenneth. "Reliability aspects of tribology", *Tribology International* 34, 2001. pp 801-808.
- MATHEW Mate, C. "Tribology on the small scale, a bottom up approach to friction, lubrication, and wear". Oxford University Press 2008. pp. 208-212.
- SHELL TELLUS S4 ME [en Línea].
http://www-static.shell.com/static/aus/downloads/lubricants/pri/shell_tellus_s4me.pdf
- ZUMGAHR, Karl-Heinz. *Microstructure and wear of materials*. Elsevier. 1987. pp. 80-124.

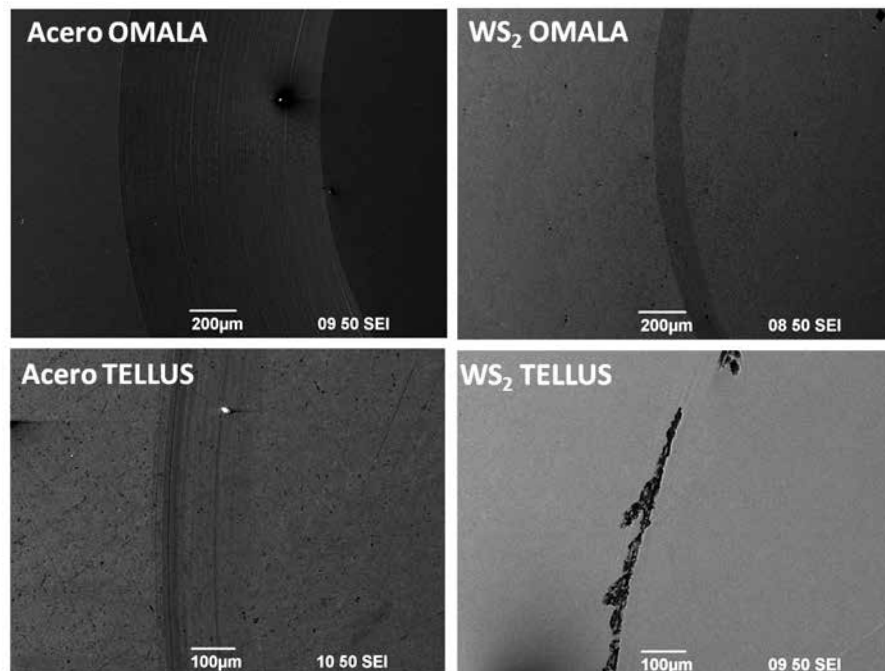


Figura 5. Micrografías SEM de la superficie de la huella para pruebas con lubricantes.