

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 HOYOS³,
RALF HROSS⁴,
FRANCISCO BLANDÓN⁵,
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-

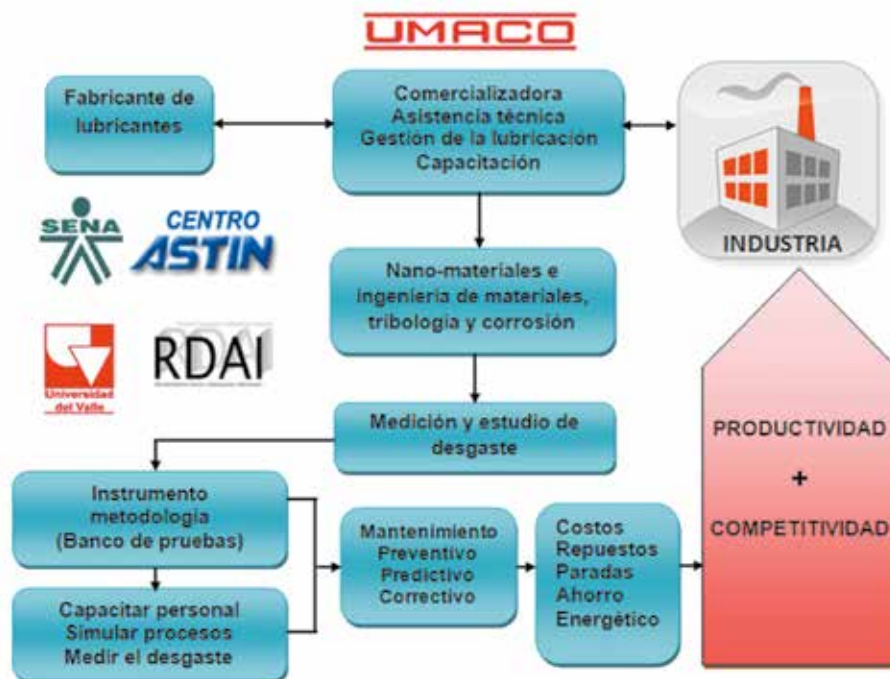


Figura 1. Esquema de trabajo propuesto entre UMACO y CIA SAS, Centro ASTIN-SENA y RDAI-Univalle.

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 metalmeccánico.

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

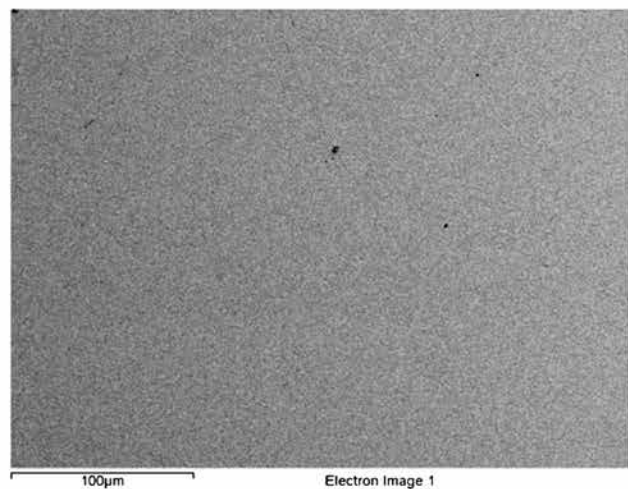
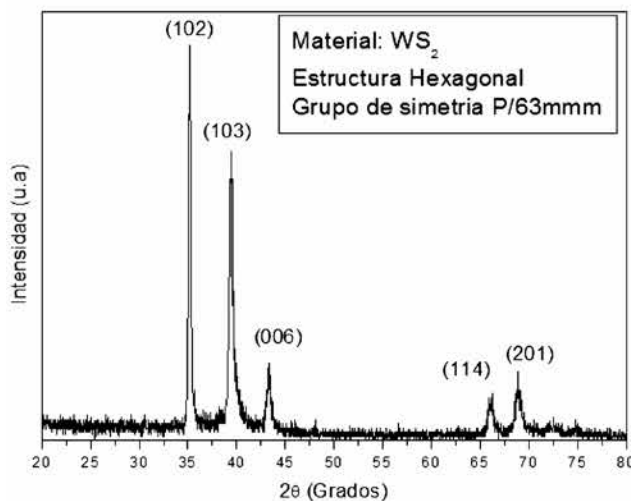


Figura 2 Patrón de difracción y morfología superficial de los recubrimientos.

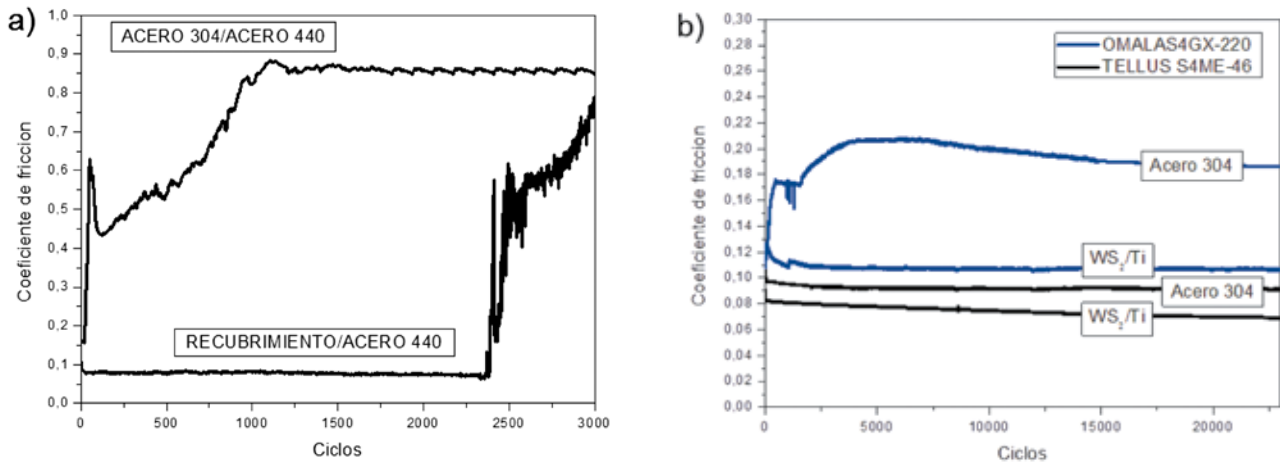


Figura 3. Coeficientes de fricción obtenidos por medio de bola en disco: a) pruebas en seco; b) pruebas con lubricantes.

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.

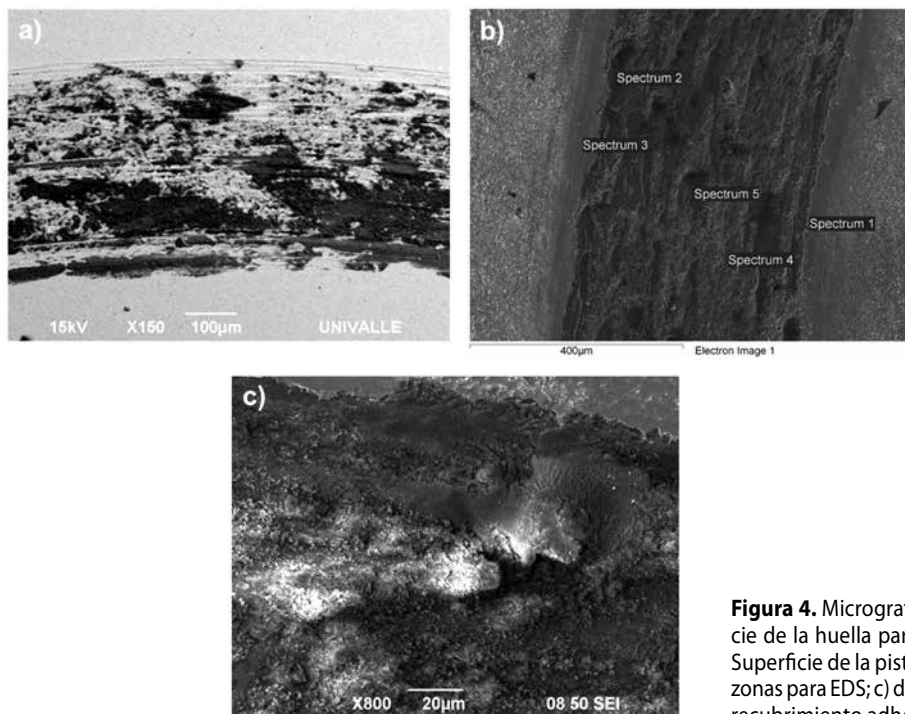


Figura 4. Micrografías SEM de la superficie de la huella para pruebas en seco: a) Superficie de la pista para el acero 304; b) zonas para EDS; c) detalle de partículas del recubrimiento adheridas.

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.

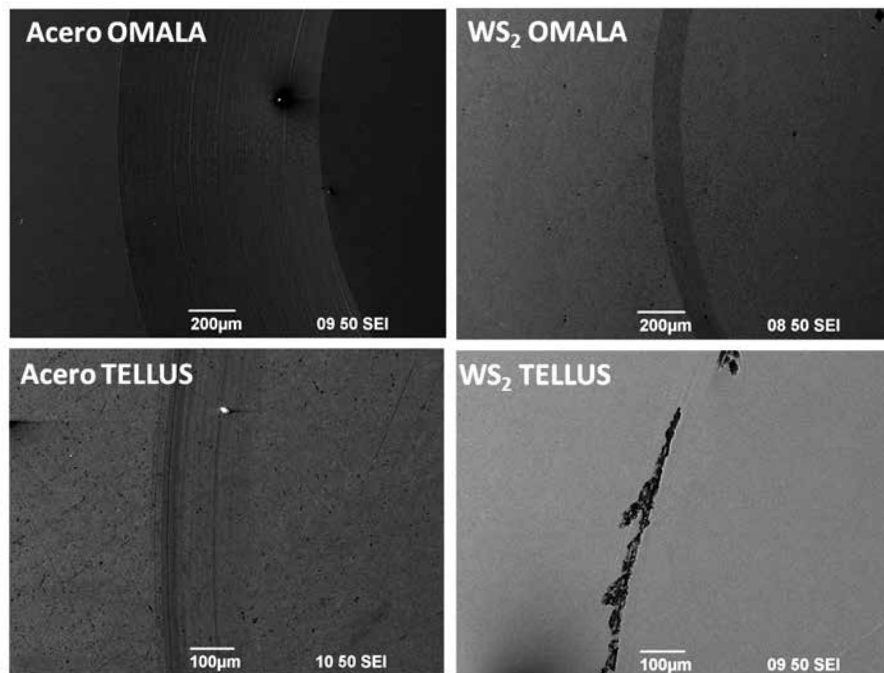


Figura 5. Micrografías SEM de la superficie de la huella para pruebas con lubricantes.

Tableros de partículas de polvillo de aserrín reforzados con subproductos reciclados (TAR)

Particle boards made of sawdust with waste materials as reinforcement (TAR)

Recibido: 17-08-2012 Aceptado: 08-10-2012

BRAIAN BUITRAGO ^{1*}
ÁNGELA PATRICIA HENAO ²
ORLANDO AYALA ³
POSEIDÓN MEJÍA ⁴

Resumen

El propósito del presente estudio es investigar el comportamiento mecánico y físico de tableros aglomerados, compuestos por polvillo de aserrín y resinas melamínica-urea formaldehído (MUF) en los que se introdujeron cargas de materiales recuperados como caucho sintético, fibra de vidrio y fibra de yute. Se estudiaron algunos parámetros como la relación molar M/UF, la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión, la gravedad específica, la absorción de humedad y el hinchamiento después de 2 y 24 horas de inmersión en agua. Los resultados experimentales arrojaron valores máximos de resistencia a la tracción y a la flexión de 10,9 MPa y de 48 MPa respectivamente, con una razón molar M/UF de 1,5. La temperatura de trabajo fue de 150 °C y el tiempo estimado por prensado fue de 150 s.

Palabras clave: Tableros aglomerados de partículas, aserrín, residuos industriales, resina melamínica, resina urea-formaldehído, resistencia a la tracción, módulo de ruptura, material compuesto.

Abstract

The purpose of this study is to investigate the mechanical and physical behavior of fiberboard composed of sawdust and Melaminica-Urea Formaldehyde (MUF) resins in which loads were introduced of some recycled materials such as: the synthetic rubber, fiberglass and jute fiber. Some parameters were studied such as M/UF molar ratio, tensile strength, flexural strength, specific gravity, moisture absorption and swelling after 2 and 24 hours of immersion in water. Experimental results yielded maximum values of tensile strength and flexural strength of 10.9 MPa and 48 MPa, respectively, with an M/UF molar ratio of 1.5. The working temperature was 150 °C and pressing the estimated time was 150 s.

Keywords: Particle boards; sawdust, industrial waste, melamine resin, urea formaldehyde resin, tensile strength, modulus of rupture, composite.

1 Ingeniero Investigador, contratista SENA.
2 Subdirector SENA, Centro Tecnológico del Mobiliario con título de Magíster.
3 Ingeniero en calidad de funcionario SENA
4 Aprendiz Sena del programa de Diseño Industrial.
* Grupo de materiales alternativos para uso en mobiliario. SENA Centro Tecnológico del mobiliario. Itagüí, Colombia. E-Mail: matinvest@misena.edu.co

Introducción

La demanda de materiales compuestos producidos a partir de residuos madereros se ha incrementado en gran medida en los últimos años gracias a la alta disponibilidad que se tiene de la materia prima y a los bajos costos de transformación que esta genera, motivo por el cual a la hora de pensar en alternativas de elaboración de mobiliario se acude al uso de materiales recuperados que no solo cuenten con un aporte de funcionalidad notable, sino que también favorezcan el medio ambiente (Lindner, 2012). El aserrín, la viruta, las fibras, los retales, y en algunos casos, las astillas, son algunas de las múltiples formas generadas como residuos de la industria maderera, las cuales a partir de una adecuada transformación y manipulación pueden llegar a convertirse en productos como pisos, paneles estructurales y divisorios (Peraza *et al.*, 2004), tableros con propiedades de aislamiento acústico y térmico, cabinas, cocinas y muebles, entre otros (Wang y Sung, 2002), y esta sería una de las formas más exitosas de reutilización de materiales y desechos madereros (Yang *et al.*, 2007). Debido a la gran cantidad de residuos que se pueden aprovechar para conformar nuevos materiales, se dispone de un abanico amplio de opciones que puede darle al investigador un sinnúmero de posibilidades relacionadas con el tipo de propiedad que este desee emplear en la nueva aplicación. Entre estos residuos se tienen productos forestales como la madera, las hojas, las raíces (Bufalino *et al.*, 2012) y los desechos agroindustriales como las fibras vegetales (Y S, and J Y, 2011). En el mundo de la construcción se aprovechan el cemento, los agregados y demás escombros; en la industria polimérica se reutilizan los termoplásticos post consumo, los elastómeros recuperados y las fibras animales, entre otros, los cuales según sea el caso, mejorarían el comportamiento mecánico, físico, químico, biológico, térmico e incluso óptico de la materia prima que se quiera transformar (Schmidt *et al.*, 1994; Felton and DeGroot, 1996; Kamdem and Munson, 1996; Vick *et al.*, 1996; De Souza *et al.*, 1997; Yalinkilic *et al.*, 1998; Wolfe and Gjinolli, 1999; Huang and Cooper, 2000; Kartal and Clausen, 2001). En el presente trabajo se abordó el desarrollo de paneles aglomerados, los cuales a diferencia de los propuestos por el mercado actual, se elaboraron a partir de polvillo de aserrín como sustituto de las astillas convencionales, lo que le da valor a este residuo maderero que se encuentra en gran cantidad y del cual no se saca beneficio en la industria de paneles aglomerados. Además, se incorporaron otro tipo de materiales entre los que se encuentran el caucho recuperado de la industria automotriz (Md, Warren, Masoud and Hashisho, 2011), la fibra de yute, considerada desecho agroindustrial y la cual se utiliza en la elaboración de tejidos, costales y cuerdas, además de la

fibra de vidrio, que es reciclada a partir de termoplásticos reforzados. El objetivo del trabajo se basó en la utilización de algunos materiales recuperados y reciclados para estudiar su comportamiento dentro de un material compuesto, analizar su compatibilidad con el polvillo de aserrín, además de las resinas termoestables, y con base en esto predecir algún tipo de funcionalidad y aplicación para futuros aportes a la industria de los tableros y la industria de mobiliario del país.

Materiales y métodos

La cantidad de polvillo de aserrín que hizo parte del estudio pertenece a la especie pino ciprés (*cupressaceae*) y fue suministrado en su totalidad por el Centro Tecnológico del Mobiliario. Dicho aserrín fue sometido a un secado inicial a temperatura ambiente y por 48 horas para disminuir su contenido de humedad, que en principio se encontraba entre 40% y 70%. Posteriormente, el material recibió un secado en horno a una temperatura de 103 °C y por un tiempo de 3 h de acuerdo con la norma ASTM D 4442-07, con el objetivo de alcanzar un contenido de humedad de entre 3% y 5% (Nemli, 2002). El polvillo de aserrín después de secado, fue pasado por las mallas 16, 20, 50 y 80 con el objetivo de encontrar una distribución adecuada en la que se pudiera determinar el tamaño de partícula promedio del 80% en peso de la masa tamizada d_{80} . De esta forma se estableció un tamaño de partícula adecuado y se logró que este fuera constante a lo largo de la experimentación. En la Tabla 1 se muestra la distribución de tamaño de partícula para 1 kg de polvillo de aserrín seco.

Tabla 1. Distribución de tamaño de partículas para 1 kg de aserrín seco.

Número de malla	Abertura (μm)	% masa retenida no acumulada
16	1200	7
20	841	10
50	297	27
80	177	56

Como se observa en la Tabla 1, el 80% de las partículas tiene un tamaño entre 177 y 841 μm . Después de establecer el tamaño adecuado, las partículas fueron impregnadas con una mezcla de resina melamínica y urea formaldehído que sirvió como adhesivo cuyas partes fueron suministradas por la empresa DIQUIM C&V Ltda. Esta mezcla fue catalizada al 2,5% con sulfato de amonio, el cual contó con un porcentaje de sólidos del 20%. La resina melamínica arrojó en el momento de la prueba una densidad de 1,28 g/cm^3 y un 61% de sólidos, y la resina urea formaldehído contó con una densidad de 1,27 g/cm^3 y un 64-66% en sólidos. Estos datos fueron corroborados en un ambiente controlado a

25 °C y 60% de humedad relativa. La Figura 1 muestra la diferencia en tamaño de partícula entre las astillas orientadas de un tablero convencional y el polvillo de aserrín de partículas dispersas utilizado para el estudio y depositado sobre la superficie de este. Como puede observarse, las astillas, con formas alargadas conservan una longitud entre ocho y diez veces mayor al diámetro promedio de las partículas de aserrín, lo que asegura que los tableros TAR cuenten con mayores ventajas desde la isotropía misma del material compuesto.



Figura 1. Imagen transversal de una capa de polvillo de aserrín depositada sobre un tablero de astillas convencional.

El triturado de caucho recuperado producto de llantas postconsumo, fue suministrado por la empresa Ecology Rubber S.A.S, ubicada en la zona industrial de Belén, y tuvo un tamaño de partícula entre 1 y 3 mm. Los hilos de fibra de vidrio tipo E producidos por la empresa Saint-Gobain Vidrios S.A. y comercializados por la empresa Sumiglas S.A.S de Medellín, tuvieron una longitud de 6 mm y una densidad de 2,6 g/cm³. El refuerzo natural de yute que sirvió de carga orgánica fue adquirido en plazas de mercado locales y cortado en hilos cuyas longitudes oscilaron entre 5 y 8 mm.

Razón molar M/UF y cantidad de adhesivo

Después de realizar múltiples pruebas en las que se determinó la capacidad de impregnación de la resina sobre

el aserrín para evaluar su poder adhesivo, se obtuvo una cantidad del 60% de resina MUF basada en la masa seca de aserrín. La relación molar entre la resina melamínica y la resina urea formaldehído para esa prueba inicial fue 1:1. Sin embargo, con el fin de disminuir un poco el uso de la resina urea formaldehído y así bajar su emisión de vapores contaminantes y conferirle al tablero mayor resistencia a la humedad por efecto de la resina melamínica (Park and Jeong, 2011), se estableció una razón molar diferente que fue seleccionada a partir de la consistencia de la pasta MUF (ver Tabla 2). En la actualidad, la investigación de adhesivos de partículas está enfocada en el desarrollo de productos derivados de componentes vegetales que cuenten con la condición de biodegradabilidad y sustituyan paulatinamente el uso de resinas con bajas tasas de degradación ambiental (Nikvash, Kharazipour and Euring, 2012).

Tabla 2. Razón molar de las pastas M/UF catalizadas a un 2,5%

Muestra	Resina UF (g)	Resina M (g)	Razón molar	Apreciación
A	5,0	5,0	1/1	Resistencia media
B	6,0	5,0	1,2/1	Resistencia baja
C	7,5	5,0	1,5/1	Alta fragilidad
D	5,0	6,0	1/1,2	Resistencia media
E	5,0	7,5	1/1,5	Alta resistencia

Teniendo en cuenta la relación molar más adecuada para la mezcla de la resina melamínica con la urea formaldehído, se procedió a determinar la formulación precisa e involucrar el resto de materiales a fin de conformar los tableros tanto en la capa interna como en las capas externas. Esta formulación se puede observar en la Tabla 3.

Elaboración del tendido de partículas

Debido a que la presión del sistema es considerable y se espera obtener tableros de media y alta densidad, hay que construir un tendido de mínimo tres 3 veces el espesor esperado con el objetivo de que la masa final quede con alta compactación (Flores *et al.*, 2011). Sin embargo, al variar la presión de la prensa, también tiene que variar la altura del tendido mediante

Tabla 3. Formulación de capa interna para un tablero de referencia sin carga a baja y alta presión

Tipo	Masa aserrín (g)	Masa resina M (g)	Masa resina UF (g)	Catalizador (%)	Presión (kgf/cm ²)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)
1	1000	360	240	2,5	15,5	150	300
2	1000	360	240	2,5	31,0	150	150

una relación directa. La Tabla 4 muestra las dimensiones de las capas interna y externa de los dos tipos de tableros utilizados en la experimentación (media y alta densidad) y la Figura 2 muestra el tendido de capa interna completamente distribuido y cuyo objetivo es lograr homogeneidad en las capas de material para evitar que algunos puntos con mayor contenido de aserrín generen una variación de densidad que afecte las propiedades físicomecánicas del compuesto. La cantidad total de tableros utilizados en la práctica experimental fue de 25, los cuales tuvieron un espesor promedio de 10 mm, un largo de 600 mm y un ancho de 350 mm.

Tabla 4. Espesor del tendido de partículas previo al prensado para tableros de media y alta densidad.

TIPO	Espesor capa externa (mm)	Espesor capa interna (mm)	Altura máxima tendido (mm)	Espesor final tablero (mm)
1	9	18	36	11
2	18	36	72	10



Figura 2. Capa externa de aserrín previa al prensado en caliente.

Gravedad específica

Esta prueba se llevó a cabo a una temperatura de 23 °C 1 °C y a una humedad relativa del 60% de acuerdo con los parámetros establecidos por el método A (volumen por medición dimensional) de la norma ASTM D 2395-07.

Absorción de agua y aumento de espesor por humedad

Esta fue realizada según las directrices del método A de la norma ASTM D 1037-12. Se sumergió cada muestra de forma horizontal por un periodo inicial de dos horas y luego por un tiempo extra de 22 horas con el objetivo de determinar el aumento de espesor de las probetas y la cantidad de agua absorbida después de transcurrida cada etapa.

Prueba de tensión y de flexión

Las cargas máximas de tracción y flexión (Figura 3) ejercidas sobre las probetas fueron estudiadas teniendo

en cuenta las secciones 9 y 10 de la norma para tableros aglomerados ASTM D1037-12. Estas pruebas se realizaron en la máquina universal de ensayos Shimadzu UH-50A (ver Figura 3) ubicada en el laboratorio de pruebas mecánicas del Sena, centro tecnológico de la manufactura avanzada. Las condiciones para los ensayos se describen en las Tablas 5 y 6.



Figura 3. Prueba de flexión estática para tableros aglomerados.

Tabla 5. Dimensiones promedio de las probetas para la prueba de tracción paralela a la superficie.

Probeta	Ancho del cuello (mm)	Espesor (mm)	Longitud de medida (mm)
Aserrín referencia	37,45	9,74	50,80
Yute 20%	38,00	10,30	50,80
Caucho 20%	37,28	9,94	50,80
F. vidrio 20%	38,10	10,00	50,80

La carga máxima utilizada para la prueba de tracción fue de 1.000 kgf y la velocidad de deformación de 4 mm/min. Las probetas fueron cortadas con una longitud máxima de 254 mm y un ancho de 50,8 mm.

Tabla 6. Dimensiones promedio de las probetas para la prueba de flexión estática

Probeta	Distancia entre apoyos (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)
Aserrín referencia	233,9	9,7	76,1
Yute 20%	247,4	10,3	76,1
Caucho 20%	238,8	9,9	76,1
F. vidrio 20%	240,2	10,0	76,1
Probetas conformadas a baja presión para aserrín de referencia, 20% caucho y refuerzo con 20% fibra de vidrio	264,2	11,0	76,1

La carga máxima utilizada fue de 1.000 kgf y la velocidad de ensayo fue de 6 mm/min.

Resultados y discusión

Los valores promediados consignados en la Tabla 7 corresponden a la gravedad específica (Sg) calculada para los tableros tipo 1 y tipo 2.

Como puede observarse, la mayor densidad fue arrojada por las probetas de aserrín de referencia, pues al no contener carga alguna se disminuyeron las vacancias a nivel interfásica generadas por las partículas y fibras, logrando así una mayor compactación del tendido. También, se puede observar que a medida que se aumentó la cantidad de carga de cada material levemente aumentó la densidad del tablero, ya que una mayor cantidad de material está relacionada con una mayor compactación y una mayor densidad del producto prensado (Jarusombuti *et al.*, 2012). Para las probetas conformadas a una presión inferior, sus valores de gravedad específica los ubican en la gama de tableros de densidad media, corroborando así la relación directa entre la presión de conformación y la densidad del tablero terminado (Chen, Liu, Chen and Zhang, 2011). Los valores de absorción de humedad promedio después de 2 y 24 h se relacionan en la Tabla 8.

Las probetas de la prueba de absorción de agua, las cuales contaron con dimensiones promedio 98 x 35 x 9,3 mm, fueron sumergidas horizontalmente en agua por un tiempo inicial de dos horas al cabo de las cuales fueron retiradas del líquido y secadas superficialmente para obtener su masa; posteriormente, fueron sumergidas de nuevo en agua fresca por un periodo de 22 horas. En todos los casos hubo absorción de agua; sin embargo, la mayor cantidad de agua absorbida está relacionada con las probetas de fibras ya que por efecto de la capilaridad el agua penetraría más profundamente y de manera más eficiente a lo largo del material (Lertsutthiwong *et al.*, 2008; Okada *et al.*, 2011). Las probetas de madera de referencia y las de caucho, por su tamaño y forma de partícula (Ashori and Sheshmani, 2010), mostraron mejor comportamiento en ambientes húmedos. La Figura 4 presenta imágenes de estereoscopía sacadas de la sección transversal de las probetas que contenían fibra de vidrio, caucho y fibra de yute respectivamente. En ellas se puede observar la forma del refuerzo y de manera comparativa se establecen diferencias entre sus tamaños con el fin de predecir algún tipo de comportamiento físico-mecánico (Gupta, Yan, and Martin, 2011).

Tabla 7. Masa y dimensiones promedio de las probetas de ensayo conformadas a alta y baja presión para cálculo de gravedad específica (Sg).

Probeta	Masa seca (g)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sg (g/cm ³)
A. Ref**	36,42	98,56	35,19	8,71	1,21
C10%**	38,11	98,87	35,12	9,45	1,16
C20%**	38,71	99,09	35,31	9,40	1,18
FV10%**	37,24	99,32	35,17	9,69	1,10
FV20%**	42,00	99,06	35,08	10,28	1,18
FY10%**	40,35	98,70	35,16	10,16	1,14
FY20%**	40,46	99,06	35,19	10,02	1,16
A. Ref*	25,60	98,78	33,39	10,08	0,77
FV20%*	26,58	98,13	34,70	9,88	0,79
FC20%*	27,06	99,00	35,50	10,00	0,77

A. ref = aserrín referencia, C= caucho, FV = fibra de vidrio y FY = fibra de yute.

*Probetas tipo 1

**Probetas tipo 2

Tabla 8. Absorción de humedad por inmersión después de 2 y 24 horas.

Muestra	Masa seca (g)	Masa 2h inmersión (g)	Masa 24h inmersión (g)	Absorción agua 2h (%)	Absorción agua 24h (%)
A. Ref	34,90	35,51	36,33	1,72	4,10
C10%	38,11	38,33	38,90	0,57	2,07
C20%	38,51	38,71	39,17	0,51	1,71
FV10%	36,83	38,70	40,67	5,07	10,41
FV20%	41,56	42,23	43,50	1,62	4,66
FY10%	37,93	38,92	40,42	2,61	6,56
FY20%	38,66	39,53	40,60	2,25	5,02

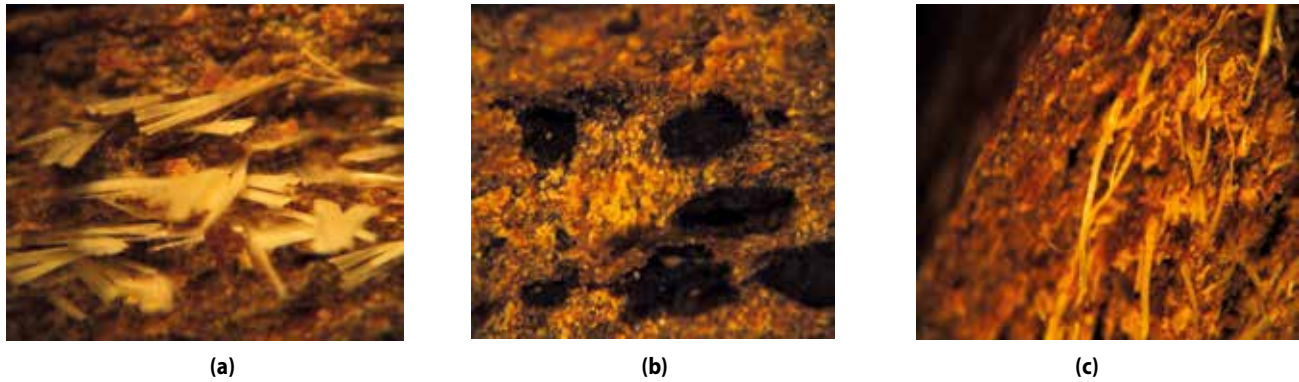


Figura 4. Imágenes estereoscópicas a 30X de la capa interna del tablero: a) 20% fibra de vidrio; b) 10% caucho; c) 10% fibra de yute.

La prueba de hinchamiento o aumento de espesor de la probeta después de 2 y 24 horas de inmersión en agua, arrojó los resultados consignados en la Tabla 9 para los tableros de aserrín de referencia, además de los reforzados con 20% de caucho, 20% de fibra de vidrio y 20% de fibra de yute. Se observa, entonces, que de manera análoga a la prueba de absorción las probetas de aserrín de referencia y las reforzadas con caucho no mostraron gran aumento de espesor atribuido a la forma de partícula y a la mejor compactación de la mezcla (Guo, Chen and Liu, 2012). Las cargas fibrosas mejoraron el transporte de humedad hacia el interior del tablero provocando con ello un mayor aumento de espesor (Ciannamea, Stefani and Ruseckaite, 2010).

En la conformación de los tableros de partículas de caucho y fibra de vidrio, al introducir cargas superiores al 30% basadas en la masa seca del aserrín, las probetas explotaban después del prensado y se formaban agrietamientos en la superficie y en el interior del material. Al observar el tamaño y la forma de las partículas (Figura 4)

se podría inferir que para el caucho el exceso de presión generado por la prensa logró que se deformara elásticamente, lo que después de retirar la presión, trajo consigo una recuperación elástica cuya fuerza rompió la estructura interna (Debbaut, 2009). Para la fibra de vidrio, dicho comportamiento se podría atribuir a la facilidad que tiene este material cerámico de retener el calor, lo cual generaría un gradiente de temperatura alto entre la capa interna y la capa externa del tablero, y es esta última la encargada de iniciar el enfriamiento desde la superficie hacia el interior del panel (Goldstein *et al.*, 2010). Al enfriarse la capa externa más rápidamente y acelerar el curado de la resina, pudo hacer que los vapores calientes de la capa interna se encontraran con una barrera sólida a la hora de salir, que trajo como consecuencia un aumento de la presión en el interior del material, el cual después de encontrar un punto concentrador de esfuerzos, inició la fractura.

Los resultados de la prueba de tracción también fueron analizados. La Tabla 10 relaciona los módulos de elasticidad,

Tabla 9. Hinchamiento de tableros después de 2 y 24 horas de inmersión en agua.

Muestra	Espesor inicial (mm)	Espesor después de 2h (mm)	Espesor después de 24h (mm)	Hinchamiento después de 2h (%)	Hinchamiento después de 24h (%)
A. Ref.	8,17	8,24	8,40	0,86	2,82
C20%	9,14	9,22	9,40	0,88	2,84
FV20%	9,62	9,71	9,96	0,94	3,53
FY20%	9,44	9,53	9,73	0,95	3,07

Tabla 10. Resultados de la prueba de tracción paralela a la superficie.

Probeta	Fuerza máx. (N)	Resistencia máxima de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación (%)
A. Ref.	3.970	10,9	1,2	1,5
C20%	3.332	9,3	1,0	1,4
FV20%	3.528	9,3	1,0	1,4
FY20%	3.130	8,2	0,9	1,4

la resistencia máxima de tracción y el porcentaje de elongación promedio mostrados por cada una de las probetas falladas.

A partir de la Figura 5 se deduce que el comportamiento de los tableros aglomerados con contenido de carga y sin ella, es altamente elástico y por ende no se da una deformación plástica notable antes de llegar al punto de ruptura. Este comportamiento es similar al de la mayoría de los materiales cerámicos y algunos polímeros termoestables (Kanchanomai and Thammaruechuc, 2009). Dicha tendencia puede estar relacionada con la gran cantidad de resina utilizada en la aglomeración de las partículas, lo cual evita que la madera y las demás cargas recicladas confirieran un carácter dúctil al material compuesto, y más bien fuera la matriz termofija la encargada de difundir la propagación de la carga. Otro aspecto importante es el tamaño de partícula usado en la elaboración de los tableros y su relación con la dureza y fragilidad del compuesto (Guru, Tekeli and Bilici, 2005), pues aunque la ciencia de materiales le ha apuntado últimamente a la refinación del grano y la microestructura para evitar puntos de alta concentración de esfuerzo y generar así materiales más rígidos y tenaces (Valencia, 1999), para el caso de la madera, tal vez se requieran hábitos fibrosos que amarren mejor las estructuras y así lograr fracturas dúctiles en vez de frágiles.

La Figura 5 también indica que aunque las fibras de yute no tuvieron un comportamiento plástico, estas, a diferencia del resto, mostraron un comportamiento más dúctil, lo que las hace favorables en aquellas aplicaciones que requieran menor soporte de carga, combinado con una mayor flexibilidad. La resistencia a la tracción de las probetas prensadas a baja presión, no logró soportar valores superiores a 1 MPa, por lo cual la máquina de tracción no detectó su comportamiento. Los resultados de la prueba de flexión estática se relacionan en la Tabla 11.

Como se observa en las Figuras 6a y 6b, el aumento de la presión trajo consigo mejores propiedades de flexión

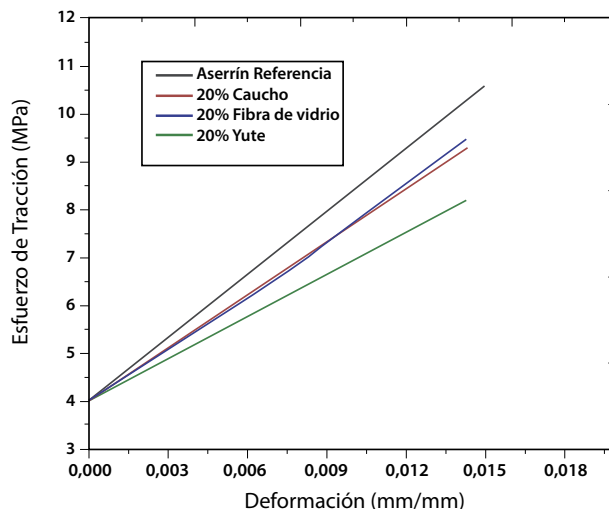


Figura 5. Curva esfuerzo-deformación de los tableros (TAR) de alta densidad.

debido al aumento de densidad del material y redujo así su alto nivel de porosidad (Nemli and Öztürk, 2006). Los valores máximos de flexión fueron alcanzados por las probetas que contenían fibras de yute a un 20% de carga basado en la masa seca del aserrín, lo cual corrobora lo dicho previamente en la prueba de tensión en la cual dichas fibras mostraron un comportamiento dúctil frente a la acción de la carga. Por otra parte, se podría mencionar que al agregar aditivos hidrofóbicos al tablero aglomerado este podría aumentar sus valores de resistencia a la tracción y la flexión (Guler, Copur and Tascioglu, 2008). Los tableros reforzados con caucho mostraron bajos valores de resistencia a la flexión a alta y baja presión de conformado, lo que los hace idóneos para aquellas aplicaciones en las cuales se requieran paneles de alta flexibilidad o que soporten vibraciones constantes.

Tabla 11. Resultados de la prueba de flexión estática.

Muestra	Carga máx (N)	Deflexión (mm)	Módulo de ruptura (KPa)	Resistencia a la flexión (MPa)
A. Ref**	872,2	8,0	42,4	42,4
C20%**	818,3	8,0	39,0	39,0
FV20%**	891,8	8,0	42,2	42,2
FY20%**	1043,7	7,0	48,0	48,0
MB*	191,1	5,0	8,2	8,2
CB*	142,1	6,0	6,1	6,1
FVB*	156,8	5,0	6,8	6,7

*Probetas tipo 1

**Probetas tipo 2

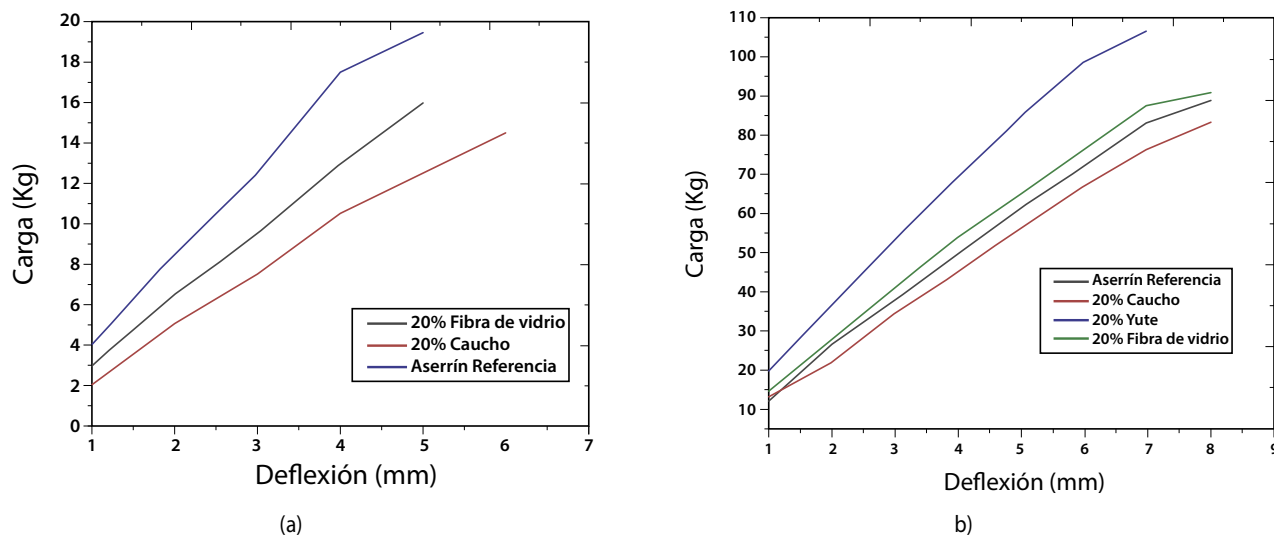


Figura 6. Comportamiento a flexión de tableros TAR. a) conformados a baja presión; b) conformados a alta presión.

Conclusiones

Los tableros aglomerados producidos a partir de aserrín reutilizado y reforzados con materiales reciclados (TAR) podrían tener un gran campo de acción en la elaboración de pisos y paredes debido a su alta densidad, combinada con su excelente comportamiento a la humedad.

Los paneles TAR pueden ser implementados en aplicaciones para exteriores ya que las características combinadas de las resinas MUF confieren al material buena resistencia a la intemperie.

Las cargas de fibras de yute dentro de la estructura de los tableros compuestos (TAR), lograron que el material ganara ductilidad y flexibilidad, lo que indica, entonces, que este desecho agroindustrial se seguirá posicionando cada vez entre los más altos lugares de materiales con altas funcionalidades y amigabilidad ambiental.

Teniendo en cuenta lo logrado en este estudio, se podría concluir, entonces, que el camino es la elaboración de tableros (TAR) cuyo enfoque apunte al uso consciente de fibras vegetales, polímeros reciclados, residuos madereros y demás residuos industriales, los cuales, tras una futura incorporación de adhesivos biodegradables, pueden contribuir exitosamente al desarrollo de tableros compuestos de partículas con grandes funcionalidades, que a su vez contribuyan a la conservación del medio ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al SENA, Centro Tecnológico del Mobiliario, institución encargada de destinar los recursos económicos, humanos y de infraestructura necesarios para llevar a cabo el presente trabajo investigativo.

Referencias

- ASHORI A., SHESHMANI S. Hybrid composites made from recycled materials: Moisture absorption and thickness swelling behavior, *Bioresource Technology*. 2010. 101, pp. 4717-4720
- ASTM D1037-12 Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials.
- ASTM D2395-07 Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials.
- ASTM D4442-07 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials.
- BUFALINO L., ALBINO V., DE SÁ V., CORRÊA R., MENDES L and ALMEIDA N. Particleboards made from australian red cedar: Processing variables and evaluation of mixed species, *Journal of Tropical Forest Science*. 2012. 24(2): 162-172.
- CHEN H., LIU Z., CHEN J., and ZHANG Q. Optimum research of hot-pressing technology of the composite board with waste wood and paper. *Advances in Natural Science*. 2011. 4(2):147-151.
- CIANNAMEA E., STEFANI P, RUSECKAITE R. Medium-density particleboards from modified rice husks and soybean protein concentrate-based adhesives, *Bioresource Technology*. 2010. 101, pp. 818-825
- DEBBAUT B. Numerical simulation of elastic recovery for uncured rubber compound with a multi-mode Simhambhatla-Leonov model, *Chemical Engineering Science*. 2009. 64: 4580-4587
- DE SOUZA, M.R., GEIMER, R.L., MOSLEMI, A.A., 1997. Degradation of conventional and CO₂-injected cement-bonded particleboard by exposure to fungi and termites. *Journal of Tropical Products*. 1997. Vol. 3 pp. 63-69.
- FELTON, C.C., DEGROOT, R.C., The recycling potential of preservative-treated wood. *Forest Products Journal*. 1996. 46: 37-46. .
- FLORESA J., PASTORA J., MARTINEZ A., GIMENO F., FRUTOSA M. Pressure Impact on Common Reed. Particleboards Manufacturing Procedure. Universidad Miguel Hernández, Alicante, Spain. 2011
- GOLDSTEIN R., IBELE W., PATANKAR S, SIMON T., KUEHN T., STRYKOWSKI P., TAMMA K., HEBERLEIN J., DAVIDSON

- J., BISCHOF J., KULACKI F., KORTSHAGEN U., GARRICK S., SRINIVASAN V., GHOSH K., MITTAL R., 2010. Heat transfer—A review of 2004 literature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. 53, pp. 4343-4396
- GULER C., COPUR Y., TASCIOGLU C., 2008. The manufacture of particleboards using mixture of peanut hull (*Arachis hypogaea* L.) and European Black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood chips, *Bioresource Technology*. 2008 99. Pp. 2893-2897
- GUO Q., CHEN X., LIU H. Experimental research on shape and size distribution of biomass particle, *Fuel*. 2012. 94, 551-555
- GUPTA G., YAN N., and MARTIN W. Effects of pressing temperature and particle size on bark board properties made from beetle-infested lodgepole pine (*Pinus contorta*) barks. *Forest Products Journal*. 2011. 61(6): 478-488.
- GÜRÜ M., TEKELI S., İBILICI I. Manufacturing of urea-formaldehyde-based composite particleboard from almond shell, *Materials and Design* 2006. 27 pp. 1148-1151
- HUANG, C., COOPER, P.A., Cement-bonded particleboards using CCA-treated wood removed from service. *Forest Products Journal*. 2000. 50 pp. 49-56.
- JARUSOMBUTI S., BAUCHONGKOL P., HIZIROGLU S., and FUEANGVIVAT V. Properties of rubberwood medium-density fiberboard bonded with starch and urea-formaldehyde. *Forest Products Journal*. 2012. 62(1): 58-62.
- KANCHANOMAI C., THAMMARUECHUC A. Effects of stress ratio on fatigue crack growth of thermoset epoxy resin, *Polymer Degradation and Stability*. 2009. 94, pp. 1772-1778
- KAMDEM, D.P., MUNSON, J.M. Reconstituted particleboards from old CCA preservative treated utility poles. *AWPA Proceedings*. 1996. 92, pp. 117-130.
- KARTAL, S.N., CLAUSEN, C.A. Leachability and decay resistance of particleboard made from acid extracted and bioremediated CCA-treated wood. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2001. 47, pp. 183-191.
- NEMLI G. Factors affecting the production of E1 type particleboard. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2002. 26, pp.31-6.
- LERTSUTTHIWONG P., KHUNTHON S., SIRALERTMUKUL K., NOOMUN K., CHANDRKRACHANG S. 2008. New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel, *Bioresource Technology*. 2008 99, pp. 4841-4845
- LINDNER R., K R., & M J. A concept for assessing sustainability impacts of forestry-wood chains. *European Journal of Forest Research*. 2012 131(1): 7-19.
- MD A., WARREN B., MASOUD J., and HASHISHO Z.. Automotive wastes. *Water Environment Research*. 2001, 83(10): 1467-1487.
- NEMLI G., ÖZTÜRK I. Influences of some factors on the formaldehyde content of particleboard, *Building and Environment*. 2006, 41, pp. 770-774
- NIKVASH N., KHARAZIPOUR A., and EURING, M. Effects of wheat protein as a biological binder in the manufacture of particleboards using a mixture of canola, hemp, bagasse, and commercial wood. *Forest Products Journal*. 2012. 62(1): 49-57.
- OKADA K., IMASE A., ISOBE T., NAKAJIMA A. Capillary rise properties of porous geopolymers prepared by an extrusion method using polylactic acid (PLA) fibers as the pore formers, *Journal of the European Ceramic Society*. 2011. 31 pp. 461-467
- PARK B., JEONG H. Hydrolytic stability and crystallinity of cured urea-formaldehyde resin adhesives with different formaldehyde/urea mole ratios, *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2011. 31, pp. 524-529
- PERAZA SÁNCHEZ, F., PERAZA SÁNCHEZ, J., ARRIAGA MARTITEGUL, F. Tableros de madera de uso estructural 2004.
- SCHMIDT, R., MARSH, J.J., BALATINECZ, J.J., COOPER, P.A.. Increased wood-cement compatibility of chromate-treated wood. *Forest Products Journal*. 1994. 44, pp.44-46.
- TERZI E., KÖSE C., BÜYÜKSARI Ü., AVCI E., AYRILMIŞ N., NAMIS. Evaluation of possible decay and termite resistance of particleboard containing waste tire rubber, *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2009. 63, pp.806-809
- VALENCIA G., ASDRÚBAL. "Control y modificación de la estructura de los materiales", Seminario técnico I, Ingeniería de Materiales, U. de A. 1999
- VICK, C.B., GEIMER, R.L., WOOD, J.E., 1996. Flakeboards from recycled CCA-treated southern pine lumber. *Forest Products Journal*. 1996. 46, pp.89-91.
- YALINKILIC, M.K., IMAMURA, Y., TAKAHASHI, M., KALAYCIOGLU, H., NEMLI, G., DEMIRCI, Z., OZDEMIR, T. Biological, physical and mechanical properties of particleboard manufactured from waste tea leaves. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 1998. 41, pp.75-84.
- YANG, T.H., LIN, C.J., WANG, S.Y., TSAI, M.J. Characteristics of particleboard made from recycled wood-waste chips impregnated with phenol formaldehyde resin. *Building and Environment*. 2007 42 (1): 189-195.
- Y S., and J Y. Properties of particleboard made from chili pepper stalks. *Journal of Tropical Forest Science* 2011. 23(4): 473-477
- WANG, D., SUN, X.S., 2002. Low density particleboard from wheat straw and corn pith. *Industrial Crops and Products*. 2002. 15, pp.47-50.
- WOLFE, R.W., GJINOLLI, A. Durability and strength of cement-bonded wood particle composites made from construction waste. *Forest Products Journal* 1999. 49, pp.24-31.