

Madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica

Plastic timber with wheat straw and polymer matrix

Ángel García-Velázquez¹
María Guadalupe Amado-Moreno²
Héctor Enrique Campbell-Ramírez³
Reyna Arcelia Brito-Páez⁴
Lydia Toscano-Palomar⁵

Fecha de recepción: 11 de diciembre del 2012

Fecha de aprobación: 4 de febrero del 2013

García-Velázquez, A; Amado-Moreno, M.G.; Campbell,-Ramírez H; Brito-Páez, R; Toscano-Palomar; L. Madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica. *Tecnología en Marcha*, Vol. 26, N° 3, Pág 26-38

- 1 Maestro en Ciencias en Enseñanza de las Ciencias. Catedrático del Departamento de Ciencias Básicas e integrante del Cuerpo Académico de Educación Superior en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Mexicali. México. Domicilio: Av. Instituto Tecnológico s/n Col. Elías Calles. Mexicali, Baja California. México. C.P.21396. C.E. angel.g20@hotmail.com.
- 2 Maestra en Ciencias en Enseñanza de las Ciencias, Maestra en Ingeniería Termodinámica. Catedrática del Departamento de Ciencias Básicas e integrante del Cuerpo Académico de Educación Superior en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Mexicali. México. Domicilio: Av. Instituto Tecnológico s/n Col. Elías Calles. Mexicali, Baja California. México. C.P.21396. C.E. lupitaamado@yahoo.com.mx.
- 3 Doctor en Ciencias. Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. México. C. E. hcampbellr@uabc.mx.
- 4 Maestra en Educación. Especialista en Estudios de Género. Catedrática del Departamento de Desarrollo Académico e integrante del Cuerpo Académico de Educación Superior en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Mexicali. México. Domicilio: Av. Instituto Tecnológico s/n Col. Elías Calles. Mexicali, Baja California. México. C.P.21396. C. E. reynabrito59@gmail.com.
- 5 Doctorante en Ciencias. Catedrática del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Mexicali. México. Domicilio: Av. Instituto Tecnológico s/n Col. Elías Calles. Mexicali, Baja California. México. C.P.21396. C.E. lydiatos@hotmail.com..

Palabras clave

Material compuesto; paja de trigo; matriz polimérica

Resumen

El objetivo de esta investigación fue elaborar madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica. En el valle de Mexicali en Baja California, México, las actividades agrícolas y la industria maquiladora constituyen la principal fuente económica de la región. Sin embargo, las actividades agrícolas generan residuos que contribuyen en gran medida a la contaminación de Mexicali y su valle. La quema de residuos agrícolas es una práctica tradicional en el valle y se realiza con el objeto de preparar la tierra para la próxima cosecha. Consiste en quemar a cielo abierto los residuos de cosechas de cultivos como paja de trigo, maíz, cártamo y cebada. En este proyecto se utilizó el residuo de paja de trigo como material de refuerzo en una matriz polimérica de resina epoxi para elaborar un material compuesto y obtener una madera plástica. Los resultados muestran que la placa de madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica posee propiedades mecánicas como dureza, flexión, absorción de humedad y densidad comparables a las de las maderas comunes de pino y alder, utilizadas en la región de Mexicali. Finalmente, el material obtenido muestra que es posible encontrar sustitutos para la madera, también plantea una alternativa de uso para la paja de trigo, con lo que se ayuda a reducir la contaminación. Los resultados de las propiedades mecánicas permiten concluir que estos materiales compuestos se pueden utilizar en la industria de la construcción o sustituir madera tal como el comprimido de aserrín o petatillo.

Key words

Composite; wheat straw; polymer matrix

Abstract

The objective of the research was to develop plastic timber with wheat straw and polymer matrix. In the Mexicali Valley in Baja California, Mexico, the agricultural activities and the maquiladora industry are the main source of income in the region. However, agricultural activities generate wastes that contribute heavily to pollution of Mexicali and its valley. The burning of agricultural waste is a traditional practice in the Valley, and is done in order to prepare the soil for the next crop; it consist in open burning of crop residues from crops like wheat straw, corn, safflower and barley. In this project we used the residue of wheat straw as reinforcement in a polymer matrix epoxy resin to produce a composite material and get a plastic wood. The results show that the wooden plate with wheat straw and plastic polymer matrix has mechanical properties such as hardness, flexure, moisture absorption, and density comparable to common pine wood alder, used in Mexicali region. Finally, the material obtained shows that it is possible to find substitutes for wood and show an alternative use for wheat straw and thus contribute to the reduction of pollution. The results of the mechanical properties made to conclude that these composite materials can be used in the construction industry or wood substitute such as compressed sawdust or petatillo.

Introducción

Las actividades agrícolas y la industria maquiladora representan la principal fuente económica de la ciudad de Mexicali, Baja California, México. La quema de residuos agrícolas es una práctica tradicional en el valle cuyo objeto es preparar la tierra para la próxima cosecha. Consiste en quemar a cielo abierto los residuos de cosechas de cultivos como paja de trigo, maíz, cártamo y cebada, generando en el proceso residuos que contribuyen en gran medida a la contaminación de Mexicali y su valle.

La quema de estos residuos produce emisiones de Metano (CH_4), Monóxido de carbono (CO), Bióxido de nitrógeno (NO_2), hidrocarburos ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) y partículas menores a 10 micras (PM10), algunas de los cuales forman parte de los gases de efecto invernadero. Los efectos de estas emisiones en la salud de la población de Mexicali y su valle son significativos, ya que el humo contiene óxidos de nitrógeno que al interactuar con la luz solar forman el smog fotoquímico formando así el ozono (O_3), que genera problemas respiratorios e irritación en los ojos. Por otro lado, se encuentra el monóxido de carbono (CO), que genera también graves problemas respiratorios. En el Cuadro I se muestra la cantidad de contaminantes emitida por hectárea (ha) de residuos agrícolas quemados.

Como se observa en el Cuadro I, el volumen de contaminantes producido por la quema de residuos de paja de trigo representa el mayor problema, debido principalmente a la gran cantidad de hectáreas de siembra de este producto en la región.

En esta investigación se diseñó y elaboró una placa de material compuesto con paja de trigo y matriz polimérica, ya que se requieren sustitutos para la

madera y a la vez ayudar a reducir la problemática de contaminación en Mexicali y su valle por la quema de residuos agrícolas.

Antecedentes

En muchas partes del mundo, la producción de madera de astillas o de cáñamo ha disminuido en relación con el total producido, debido a la escasez de estas materias primas, dejando de lado las solicitudes y el interés de los consumidores. Se ha comprobado que se pueden hacer paneles satisfactorios con muchos otros residuos vegetales, entre los que figuran la cáscara de arroz, la paja de trigo y la cáscara de maní.

La búsqueda de materiales con mejores propiedades, mayor ligereza y más económicos dio lugar al surgimiento de los materiales reforzados. Estos materiales no necesariamente fueron materiales nuevos sino mezclas de los que ya existían. Con estas mezclas se lograron propiedades superiores a las propiedades inherentes de cada material por separado.

Con el tiempo surgieron nuevos métodos para la elaboración de estos materiales y se perfeccionaron los existentes. Esto dio lugar a la aparición de una gran variedad de materiales compuestos, cubriendo una amplia gama de propiedades, y con ello un gran incremento en sus usos. Hoy en día a estos materiales se les conoce como materiales de nueva generación.

En el siglo pasado, alrededor de todo el mundo aparecieron materiales compuestos de matriz polimérica, reforzados con fibras naturales y sintéticas con el fin de sustituir los materiales convencionales, como madera, metal y vidrio.

Cuadro I. Cantidad en kg de contaminantes emitidos en la quema por hectárea.

Cultivo	Ha	FC/Ha *	CO	HC **	PM	NO_2
Cebada	141 869	4,25	303,0	29,0	42,50	10,50
Maíz	88 148	10,25	5 14,75	57,25	66,75	20,00
Trigo	273 643	4,75	233,00	19,50	28,00	8,75

Fuente: Quintero, 2008.

* Factor de carga: toneladas de desperdicios del cultivo por hectárea.

** Hidrocarburos ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$).

Los avances obtenidos en los métodos de producción de estos materiales, unidos a sus excelentes propiedades físicas, hicieron que fueran rápidamente aceptados y empleados en sectores como el de la construcción, el industrial y otros de altas exigencias como el aeronáutico y aeroespacial.

Lo anterior permitió sustentar la idea de que se podía diseñar y elaborar una placa de material compuesto con paja de trigo y matriz polimérica, toda vez que se requieren sustitutos para la madera y que ya se han obtenido placas con otros materiales de desecho, tales como cáscara de cacahuate, cáscara de arroz y cáscara de coco (Cox, 1952).

El desarrollo de la investigación muestra un impacto social importante ya que ofrece una alternativa para la elaboración de materiales sustitutos de la madera, a la vez que coadyuva en la reducción de las quemaduras de los desechos agrícolas como la paja de trigo, contribuyendo así a la reducción de la contaminación del aire de Mexicali y su valle.

Marco teórico

Un material compuesto es aquel que se forma al mezclar dos o más materiales distintos, sin que haya reacción química. El material compuesto presenta dos elementos principales: un refuerzo y una matriz. El primero de ellos es el elemento que otorga la resistencia y el segundo actúa como litigante (Plueddemann, 1974).

La combinación adecuada de estos componentes origina materiales con mejores propiedades que las partes que los componen por separado. En los materiales compuestos se distinguen dos componentes:

- La matriz, que actúa como litigante. Existen de varios tipos: matriz metálica, matriz cerámica, matriz de carbón y matriz orgánica o polimérica, como la de fibra de carbono y fibra de vidrio.
- El refuerzo, que es el componente que le da resistencia. Existen dos tipos, los de fibras y los de cargas.

El material de refuerzo tiene como objeto soportar el esfuerzo aplicado, mientras que a la matriz polimérica le corresponde transmitir de forma efectiva y uniforme el esfuerzo (Sato, 1962).

Se ha documentado ampliamente que el principal efecto del refuerzo es aumentar la rigidez y la resistencia del polímero (Cox, 1952, Lees, 1968).

La matriz polimérica está constituida por las resinas de unión y por agentes de acoplamiento. Las más utilizadas para formar materiales compuestos son las resinas fenólicas, de úrea-formaldehído, resinas de melanina-úrea-formaldehído, resinas de melanina, resinas de fenol-formaldehído y resinas de resorcinol-formaldehído.

El interés principal de este proyecto fue utilizar paja de trigo como material de refuerzo y resina epoxi bisfenol A, que es la más utilizada comercialmente y es elaborada por reacción del bisfenol A con epíclorohidrina como material aglutinante o de unión (Miller, 1986).

En la región del valle de Mexicali se producen grandes cantidades de fibra de paja de trigo que no se utiliza. Para deshacerse de ella, el agricultor la quema sin importar los daños que esto conlleva.

Por otro lado, muchos países en desarrollo no tienen reservas forestales para cubrir sus necesidades de leña, madera industrial, madera aserrada y paneles de composiciones basadas en madera. Pero sí disponen de cantidades relativamente grandes de materiales de lignocelulosa disponibles en forma de residuos agrícolas de las cosechas (Adamson, 1982; Berger, 1984).

Metodología

El procedimiento y la metodología de la investigación fueron los siguientes:

- Determinación de las propiedades de los diferentes tipos de maderas existentes en el mercado utilizadas para la construcción, por medio de entrevistas con proveedores y vendedores, carpinteros y fabricantes de muebles de madera. Se consultó sobre los principales productos utilizados y las características más apreciadas; y adquisición de las maderas de pino y alder de mayor uso en la región para la caracterización cuantitativa de las propiedades más significativas para los usuarios, como densidad, porcentaje de humedad, dureza, flexibilidad y conductividad térmica.
- Construcción del molde de aluminio para elaborar las placas de material compuesto.
- Realización, bajo las normas ASTM, de las pruebas y ensayos con la madera más utilizada en la región y en la placa de material compuesto, así como la comparación de sus características.

Material utilizado para la elaboración de la placa de material compuesto:

Se adquirió la paja de trigo mostrada en la Figura 1 y se molió en un molino para semilla marca Swissmex Modelo LX 300 accionado por tractor, según se muestra en la Figura 2.

Posteriormente, con el fin de reducir la cantidad de lignocelulosa en los tallos de paja de trigo y obtener



Figura 1. Paja de trigo sin moler.

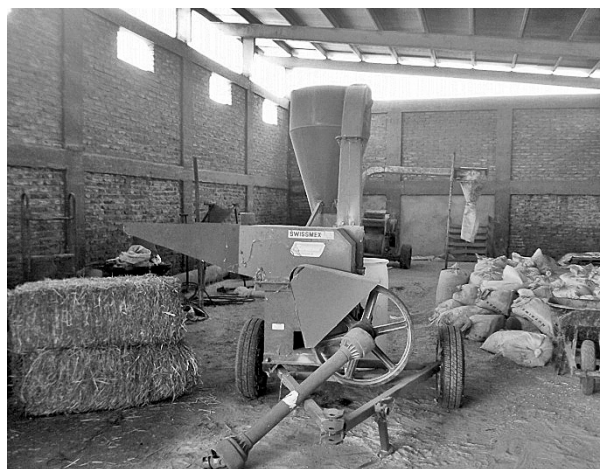


Figura 2. Molino Swissmex

Cuadro 2. Tamaños de partícula de la paja utilizada.

Número de Identificación	Tamiz	Tamaño en mm.
1	14	1.400
2	20	0.840
3	40	0.420
4	60	0.248

mayor adhesión entre resina y paja de trigo, la paja se molió en molinos de grano común, ya que estos ejercen esfuerzos cortantes sobre la paja.

La paja triturada y molida conserva una geometría alargada, por este motivo fue necesario cernir para separar partículas con tamices de diferente tamaño, obteniéndose cuatro tamaños de partícula que se muestran en el Cuadro 2. En la Figura 3 se observa la paja utilizada para elaborar la placa de material compuesto con los cuatro diferentes tamaños de partícula.



Figura 3. Tamaños de partícula de la paja de trigo.

Diseño del experimento

En el Cuadro 3 se muestra el diseño del experimento realizado con dos factores, estos fueron tamaño de partícula y porcentaje en peso de la paja de trigo, con cuatro niveles cada uno y cinco réplicas, así como la clave de identificación.

Se utilizó la resina epoxi base bisfenol A, que presenta mayor resistencia a la deformación y menor absorción de agua; como catalizador se utilizaron aminas alifáticas a una proporción en peso de 10:1.

Mezclado e impregnación

A una cantidad constante de paja de trigo se le agregaron diferentes porcentajes en peso de la mezcla de resina epoxi-catalizador. Siendo los porcentajes utilizados de 40, 50, 60 y 70% respectivamente. En la Figura 4 se observa la mezcla de resina epoxi-catalizador con la paja de trigo, la cual se realizó a temperatura ambiente durante un período de 10

Cuadro 3. Diseño del experimento con dos factores (paja de trigo y tamaño de partícula).

% en peso de paja	Tamaño de partícula			
	1	2	3	4
30	1A	2A	3A	4A
40	1B	2B	3B	4B
50	1C	2C	3C	4C
60	1D	2D	3D	4D

minutos en un mezclador mecánico y se colocó en un molde de aluminio, como se observa en la Figura 5. El proceso para el moldeado y curado del aglomerado se realizó a temperatura ambiente, utilizando una presión de 500Pa en una prensa de platos calientes como se muestra en la Figura 6. El tiempo de curado en prensa fue de tres horas a temperatura ambiente.



Figura 4. Mezcla de resina epoxi-catalizador.

Se elaboraron placas de las dimensiones 150 mm x 76,0 mm x 3 mm con cada una de las combinaciones, utilizando los diferentes tamaños de partícula y porcentajes en peso de paja de trigo que se muestran en la Figura 7.

Teniendo las placas de madera plástica, se elaboraron cinco probetas para cada combinación de tamaño de partícula y porcentaje en peso de paja

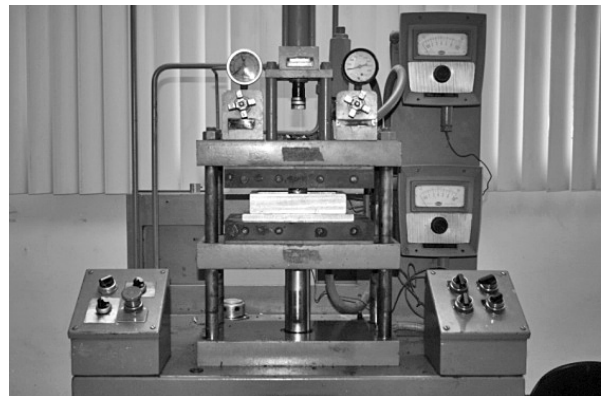


Figura 6. Prensa de platos calientes.



Figura 5. Molde con mezcla de resina epoxi-catalizador con paja de trigo.

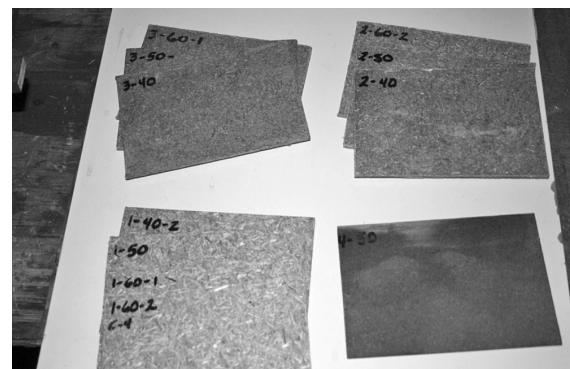


Figura 7. Placas de madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica obtenidas para los diferentes tamaños de partícula y porcentaje en peso de paja de trigo.

de trigo, según las normas ASTM D790-02 para la realización de pruebas y caracterización. Las probetas se muestran en la Figura 8.

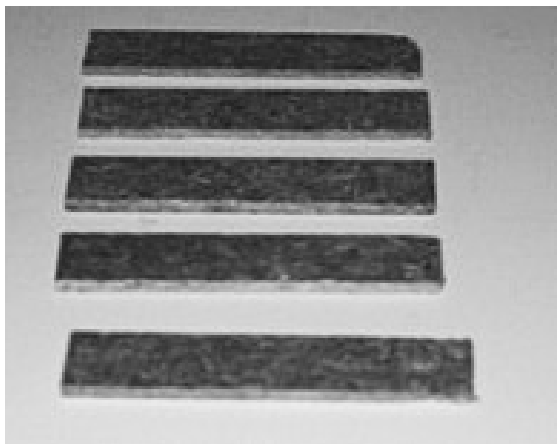


Figura 8. Probetas para pruebas.

Pruebas realizadas a la madera y la placa de material compuesto obtenido

La caracterización física de la placa de madera plástica comprende la determinación de las propiedades de porcentaje de absorción de humedad, medición de densidad, resistencia a la flexión, resistencia a la tensión y conductividad térmica en las placas elaboradas.

Medición del porcentaje o absorción de humedad

Esta es la propiedad más importante, pues influye sobre casi todas las demás propiedades, tanto físicas como mecánicas. Esto implica mayor o menor aptitud para su elaboración, estabilidad dimensional y resistencia al ataque de microorganismos. Se realizó según la norma ASTM D570-98.

La prueba se realizó para la madera y para la placa de material compuesto en condiciones anhidras, secadas en un horno a 50°C durante 24 horas. Posteriormente se pesaron e introdujeron en agua destilada durante 24 horas; al cumplirse el tiempo se retiraron del agua, se les retiró el agua de la superficie y se pesaron de nuevo. La diferencia de peso se utiliza para calcular el contenido de humedad de acuerdo con la siguiente fórmula.

Porcentaje de Absorción de Humedad =

$$\frac{(\text{Peso Húmedo} - \text{Peso Seco})}{\text{Peso Seco}} \times 100 \quad (1)$$

Las dimensiones de las probetas utilizadas, que tenían forma de barra, para la madera de pino y alder fueron 76,2 mm (3 pulgadas) por 25,4 mm (1 pulgada) y un espesor de 2,54 mm (1 pulgada). Se hicieron tres probetas en dirección de la beta y tres en dirección perpendicular a la beta. En la Figura 9 se observan las probetas para el pino y alder. Las probetas de la placa de madera plástica solo variaron en el espesor, que fue de 3,2 mm (1/8 pulgadas).

Debido a que la madera de pino y alder está constituida por materiales anisotrópicos, las propiedades de humedad absorbida y flexión se midieron en dirección a la beta y en dirección perpendicular a esta.

Notación utilizada para la identificación

Para el alder en dirección de la beta A-D, para el alder en dirección perpendicular a la beta A-P, para el pino en dirección de la beta P-D y para el pino en dirección perpendicular a la beta P-P.

Como los aglomerados, es decir, las placas de madera plástica, son materiales isotrópicos, presentan las mismas propiedades en cualquier dirección, por lo que no se realizó tal distinción en dirección de prueba.

Cada muestra se secó durante 24 horas a una temperatura de 50°C, se retiraron de la estufa y se pesaron en una balanza analítica. Posteriormente se sumergieron en agua destilada, como se observa en

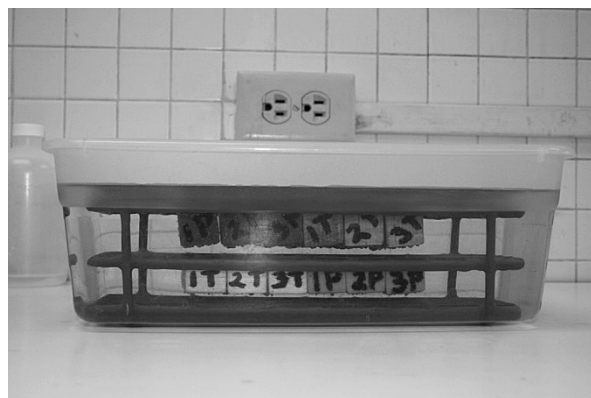


Figura 9. Probetas de pino y alder sumergidas en agua destilada.

la Figura 9, a una temperatura de 24°C durante 24 horas, tras lo cual se retiraron del agua, se eliminó el agua en la superficie con un trapo y se pesaron de nuevo.

Con el uso de la fórmula (1) se determinó el porcentaje de humedad para cada tipo de madera y para la placa de madera plástica obtenida.

Medición de densidad

Es el peso de la unidad de volumen de la madera y dependerá en gran medida de la humedad. Convencionalmente, la densidad de la madera se toma con humedad menor del 12%.

La densidad aparente de la madera de alder y pino se midió en condiciones anhidras secadas a 50°C durante 24 horas, posteriormente se pesaron y se les midió el volumen.

La densidad de la placa de madera plástica se obtuvo por pesado y medición del volumen de las placas inmediatamente después de ser extraídas del molde.

Medición de dureza

La determinación de la dureza de una muestra de madera se basa en la resistencia que esta ofrece a la penetración de una semiesfera metálica a una profundidad específica, por acción de un incremento gradual de carga. Es una característica que depende de la cohesión de las fibras y de su estructura. Se manifiesta en la dificultad que presenta el material para ser penetrado por otros cuerpos (clavos, tornillos, etc.) o ser trabajada (cepillo, sierra, formón, etc.). Determina la resistencia que tiene al desgaste por abrasión, al rayado, a ser clavada, cortada por sierra, etc. Depende de su densidad, a mayor densidad mayor dureza. Esta prueba se realiza según la norma NOM-EE-165-1984.

Medición de flexión o flexibilidad

Representa la capacidad de los materiales a doblarse sin romperse debido a la aplicación de una carga. Se determinó por medio de la prueba de flexión según la norma ASTM D790-02, que es aplicable a plásticos reforzados, materiales compuestos y materiales que tienen la característica de ser aislantes eléctricos en forma de barras rectangulares moldeadas directamente o cortadas de la placa.

El esfuerzo de flexión se obtiene por la relación:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

La deflexión máxima está dada por:

$$D = \frac{rL^2}{6d} \quad (3)$$

Donde:

σ_f = Resistencia a la flexión estática, MPa (psia)

P = Carga a la ruptura, N (lb_f)

L = Separación entre apoyos, mm (pulgadas)

b = Ancho de la muestra, mm (pulgadas)

d = Espesor de la muestra, mm (pulgadas)

D = Máxima deflexión medida desde el centro de la probeta, mm (pulgadas)

r = Deformación máxima al 5%

Esta prueba solo se le realizó a las muestras que a simple vista presentaran mayor consistencia, cohesión entre paja de trigo y matriz polimérica. A las probetas obtenidas se les probó la resistencia a la flexión en tres puntos, en la Máquina Universal Instron serie 4505 mostrada en la Figura 10.

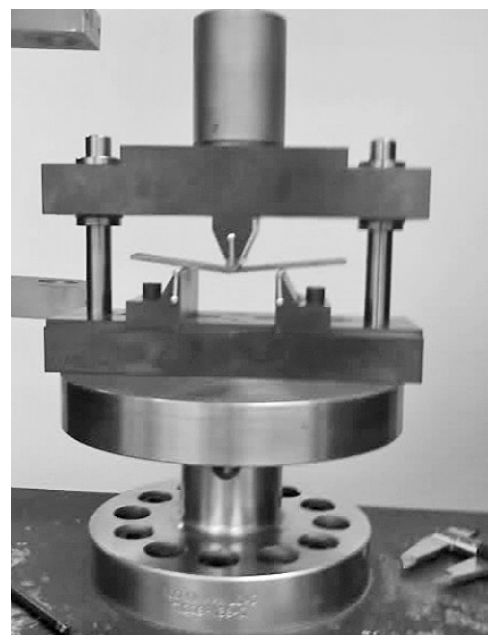


Figura 10. Máquina Universal Instron, Serie 4505.

Medición de conductividad térmica

En esta prueba se midió el flujo de calor en estado estable y la resistencia térmica de transmisión por medio de aparatos medidores de flujo de calor. La norma ASTM C518 indica el método estándar para las mediciones. Las determinaciones de conductividad térmica aparente y resistencia térmica se realizaron utilizando el medidor de calor LaserComp Fox 300.

Para las mediciones de la conductividad térmica se utilizaron cuatro muestras del material en forma de placa con un espesor promedio de 2,63 cm. Las muestras presentaron superficies lisas y ortogonales y no requirieron ser rectificadas para disminuir los errores de contacto entre las placas del medidor de flujo de calor y la superficie de la placa por el efecto del aire que puede quedar atrapado entre estas superficies.

Para mantener los flujos de calor dentro de los límites del aparato, se introdujeron las muestras formando resistencias en serie con placas de poliestireno usando una placa de poliestireno como referencia, determinando su conductividad térmica.

De acuerdo con la norma ASTM C1058-92, se seleccionaron como temperaturas medias 4°C (40°F), 10°C (50°F), 24°C (75°F) y 38°C (100°F), que son las que se recomiendan para aislantes para utilizar en edificaciones. Sobre esta base, se utilizó un diferencial de temperatura de 22°C.

Resultados

En los cuadros 4 y 5 se presentan los porcentajes de absorción de humedad para el pino, alder y para la placa de madera plástica respectivamente. Se observa que se obtiene un porcentaje de absorción de humedad considerablemente alto para el tamaño de partícula 1 (1,4 mm), el más grande, lo cual se debe a que la paja no se cubre por completo con la resina epoxi, lo que origina una mayor absorción de humedad.

Los valores de densidad se muestran en los cuadros 6 y 7 respectivamente. Se observa que la densidad de la placa de madera plástica con cualquier porcentaje de paja de trigo resulta ser mayor que la de los dos tipos de madera considerados. Es decir, a mayor porcentaje de paja de trigo, mayor densidad. También la densidad aumenta al disminuir el tamaño de partícula. Esto hace a la placa de material compuesto obtenido un sustituto del pino y el alder en algunas de sus aplicaciones, como la fabricación de muebles y andamios.

En los cuadros 8 y 9 se observa la dureza para el pino, el alder y la placa de madera plástica. La dureza para diferentes porcentajes de paja y un mismo tamaño de partícula se mantiene aproximadamente constante, mientras que se incrementa al disminuir el tamaño de partícula. La placa de madera plástica presenta una mayor dureza para el tamaño de partícula más pequeño de 0,248 mm, y para el tamaño de partícula 2 de 0,84 mm la dureza es parecida a la

Cuadro 4. Porcentaje de absorción de humedad de la madera de pino y alder.

% de absorción de humedad para la madera	Alder		Pino	
	En dirección de la beta (A-D)	Dirección perpendicular de la beta (A-P)	En dirección de la beta (P-D)	Dirección perpendicular de la beta (P-P)
	51,72	59,17	22,18	34,40

Alder en dirección de la beta A-D, alder en dirección perpendicular a la beta A-P, pino en dirección de la beta P-D, pino en dirección perpendicular a la beta P-P.

Cuadro 5. Porcentaje de absorción de humedad de la placa de material compuesto con paja de trigo y matriz polimérica.

Muestra	IA	IB	IC	ID	2A	2B	2C	2D
% humedad	61,25	62,57	63,01	63,48	30,05	30,28	31,36	32,40
Muestra	3A	3B	3C	3D	4A	4B	4C	4D
% humedad	24,61	26,15	26,77	27,14	28,91	30,18	33,45	34,12

Cuadro 6. Medición de densidad en la madera de pino y alder.

Densidad (Kg/m ³)	Alder	Pino
	449	391

Cuadro 7. Medición de densidad en la placa de material compuesto con paja de trigo y matriz polimérica.

Muestra	1A	1B	1C	1D	2A	2B	2C	2D
Densidad (Kg/m ³)	591	558	527	516	522	518	491	656
Muestra	3A	3B	3C	3D	4A	4B	4C	4D
Densidad (Kg/m ³)	752	748	741	735	866	851	834	826

Cuadro 8. Medición de dureza en las maderas de pino y alder.

Dureza (Newton)	Alder	Pino
	2624	1887

Cuadro 9. Medición de dureza en la placa de material compuesto con paja de trigo y matriz polimérica.

Muestra	1A	1B	1C	1D	2A	2B	2C	2D
Dureza N	1248	1216	1135	1048	2019	1991	1988	1961
Muestra	3A	3B	3C	3D	4A	4B	4C	4D
Dureza N	2581	2644	2659	2784	3555	3457	3354	3324

del pino, mientras que el tamaño de partícula 3 de 0,42 mm tiene una dureza semejante a la del alder.

En los cuadros 10 y 11 se presentan los valores de la medición de flexión para la madera de pino y alder y la placa de madera plástica respectivamente. Se observa que las flexiones de la madera plástica son comparables a las del pino y el alder. En particular, la madera plástica con 60% de paja de trigo y un tamaño de partícula 4 de 0,248 mm es más flexible que cualquiera de los valores reportados para el pino y el alder.

Medición de conductividad térmica

Las temperaturas en las placas del medidor de flujo de calor se indican en el Cuadro 12.

Se observa en los cuadros 13 y 14 que las variaciones de conductividad térmica entre las muestras del mismo tipo 2 o 3 no son significativas, y que entre los tipos 2 y 3, esta última es ligeramente superior, coincidente con una densidad ligeramente mayor. Sin embargo, se requieren más muestras con

diferentes densidades para obtener una correlación consistente.

Los resultados obtenidos indican que la resistencia térmica promedio es del orden de 10 veces la reportada para concreto típico (ASHRAE) y del orden de la tercera parte de la resistencia del poliestireno.

Conclusiones

En este proyecto se elaboró un material compuesto con paja de trigo como material de refuerzo y una matriz polimérica de resina epoxi, obteniéndose una placa de madera plástica. Se determinó la formulación óptima de la paja, la resina y el aditivo. El proceso y el equipo utilizados se establecieron a nivel de prototipo.

La placa de madera plástica obtenida en cada una de las combinaciones presenta una estructura uniforme y homogénea y una textura fina, que permite que sus dos caras tengan un buen acabado. Es posible trabajarla de igual manera que a la madera sólida.

Cuadro 10. Medición de flexión en las maderas de pino y alder.

Flexión Estática (kg/cm ²)	Alder		Pino	
	En dirección de la beta (A-D)	Dirección perpendicular de la beta (A-P)	En dirección de la beta (P-D)	Dirección perpendicular de la beta (P-P)
	27,18	35,1	28,18	42,4

Cuadro 11. Medición de flexión en la placa de material compuesto con paja de trigo y matriz polimérica. Promedio de cinco réplicas.

Propiedad	Probetas	Valor promedio	Desviación estándar
Flexión Estática (kg/cm ²)	1D	27,147	2,19547
	2D	38,642	1,82226
	2C	38,088	1,72759
	3D	30,916	1,75569
	3C	31,434	1,03365
	4D	47,727	1,32502
	4C	36,491	1,88689

Cuadro 12. Temperaturas de prueba seleccionadas para la conductividad térmica.

Placa superior (°C)	Placa inferior (°C)	Temperatura media (°C)
-7	15	4
-1	21	10
13	35	24
27	49	38

Cuadro 13. Conductividades térmicas aparentes (W/mK).

T°C	2.1	2.2	3.1	3.2
30,31	0,1137	0,1155	0,1214	0,1224
16,31	0,1098	0,1107	0,1163	0,1168
2,26	0,1065	0,1080	0,1149	0,1135
-3,71	0,1054	0,1064	0,1115	0,1117

Cuadro 14. Resistencias térmicas (m²K/W).

T°C	2.1	2.2	3.1	3.2
30,31	0,230	0,231	0,22	0,214
16,31	0,238	0,241	0,23	0,225
2,26	0,245	0,246	0,23	0,231
-3,71	0,248	0,249	0,24	0,235

Es posible taladrarla, lijlarla, clavarla o aserrarla y presenta un peso mayor que la madera.

El material compuesto obtenido puede sustituir a la madera común que existe en el mercado en cuanto a su operación, pero se requiere la optimización del costo de producción para que realmente sea competitivo. Sin embargo, los resultados de las propiedades mecánicas realizadas permiten concluir que estos materiales compuestos pueden ser utilizados en la industria de la construcción o sustituir madera tal como comprimido de aserrín o petatillo.

Los factores que más afectan las características finales del producto son: concentración de la resina, tamaño de la partícula de paja y un proceso de mezclado que permita asegurar la impregnación de toda la paja.

Recomendaciones

Para obtener una mejor caracterización de la madera plástica se recomienda realizar pruebas de resistencia a los rayos ultravioleta, flexión en frío, retardancia a la flama, adhesión con colas, taladrado y clavado.

Las diferentes combinaciones de mezclas de paja de trigo con matriz polimérica de resina epoxi permiten obtener madera con una gran variedad de propiedades, como materiales de apariencia más sólida y elevada resistencia mecánica. Se recomienda utilizar un tamaño de partícula de paja de trigo de aproximadamente 0.4 micras o menos (harina de paja) y presiones de conformado mayores a 1500 pascales, baja conductividad térmica con tamaños de partícula de paja grandes (mayores a 1 mm) y aplicando bajas presiones de conformado a aproximadamente 40 pascales.

Con la mezcla de paja de trigo y resina epoxi es posible conformar superficies curvas, acanaladas, canaletas, ángulos, zoclos, etc. Desde luego, conociendo las especificaciones deseadas del producto final, es necesario realizar pruebas con las concentraciones de paja y resina a diferentes presiones de conformado.

Normas consultadas

ASTM D570-98 (*Absorción de humedad*)

NOM-EE-I65 (*Medición de dureza*)

ASTM D790-02 (*Medición de flexión*)

ASTM C518 (*Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*).

ASTM C1045 (*Standard Practice for Calculating Thermal Transmission Properties from Steady-State Heat Flux Measurements*).

ASTM C1058 (*Standard Practice for Selecting Temperatures for Evaluating and Reporting Thermal Properties of Thermal Insulation*).

ASTM C1132 (*Standard Practice for Calibration of the Heat Flow Meter Apparatus*).

Agradecimientos

Al Lic. Rubén Ernesto Armenta Zanabia, por el apoyo económico otorgado para la realización de este proyecto.

A la empresa Honeywell de Mexicali, Baja California, México, que permitió el acceso a su laboratorio de desarrollo de materiales compuestos para la realización de las pruebas de dureza y flexión del material compuesto obtenido.

Bibliografía

Adamson, A. (1982). *Physical Chemistry of Surfaces*. Nueva York: John Wiley and Sons Inc.

Berger, J. & Eckstein, Y. (1984). *Adhesive Joints*. Nueva York: Mittal, K.L. Plenum Press.

Cox, H. (1952, marzo). The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *British Journal of Applied Physics*, Vol. 3: 7-9. Obtenido desde http://iopscience.iop.org/0508-3443/3/3/302/pdf/0508-3443_3_3_302.pdf.

Lees, J. (1968, julio). A study of the tensile modulus of short fiber reinforced plastics. *Polymer Engineering Science*, Vol. 8(3): 186-194. Obtenido desde <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.760080303/pdf>.

Miller, J. & Ishida, H. (1986). *Chemically Modified Surfaces*. Nueva York: K. Leyde, Gordon and Breach.

Plueddemann, E. (1974). Mechanism of adhesion through silane coupling agents. *Composites Materials*, Vol. 6. New York: Academic Press.

Quintero, N.M. (2008, diciembre). Contaminación y control de las quemas agrícolas en Imperial, California y Mexicali, Baja California. *Región y Sociedad*, Vol. 20(43): 3-24. Obtenido desde <https://www.colson.edu.mx:4433/Revista/Articulos/43/15813-1quintero.pdf>.

Sato, Y. & Furukawa, J. (1962, septiembre). A Molecular Theory of Filler Reinforcement Based on the Concept of Internal Deformation. *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 35(4): 857-876. Obtenido desde <http://rubberchemtechnol.org/doi/pdf/10.5254/1.3539978>.