

MONOGRAFIA

MATERIAL COMPUESTO DE FIBRAS DE BAGAZO EN MATRIZ DE CEMENTO

Autores: MSc. Magali Torres Fuentes

Dr. Carlos O. Martín Medina

Lic. Wifredo Olivera Muñiz

MSc. Fernando Fernández Urquiza

Introducción

Los materiales compuestos son un sistema formado por más de una fase en una escala macroscópica cuyas propiedades y comportamientos son superiores a las de los materiales que las componen cuando actúan de manera independiente

La matriz es una fase del material compuesto. Debe tener la propiedad de aglutinar a los demás componentes. Existen diversos tipos de matrices: poliméricas, metálicas, cementicia, cerámicas. Los materiales compuestos de matriz polimérica se caracterizan por su alta resistencia mecánica (resistencia a compresión, a flexión) y los materiales compuestos de matriz metálica se caracterizan por su dureza, resistencia al desgaste o por mantener propiedades mecánicas a altas temperaturas. Los materiales compuestos con matriz de cemento se asemejan a los de matriz cerámica, ya que estas se emplean cuando se quieren propiedades como resistencia a la flexión (como en el caso de estructuras reforzadas con metales) y a la compresión. Los materiales compuestos de matriz cerámica necesitan las fibras para bloquear la propagación de fisuras y con esto darle tenacidad, ya que ellos mismos son materiales resistentes por la propia naturaleza de la matriz

Otra fase es el refuerzo, que puede estar formado por partículas dispersas, láminas, fibras, etc. Las fibras naturales se han empleado con este fin desde tiempos históricos. El adobe (arcilla y fibras procedentes de cereales) se utilizaba en Mesopotamia desde el año 300 a.n.e. La fibra es el principal componente de soporte de la carga.

La madera se puede considerar como un material compuesto natural, constituido por fibras de celulosa unidas por una matriz de polímeros, principalmente lignina.

En el refuerzo con fibra se requiere una fracción de volumen inferior cuando la carga va a ser paralela a la dirección de las fibras en lugar de ser perpendicular a éstas. Sin embargo, en todos los casos debe controlarse las fracciones volumétricas de las fibras, las partículas o las fases dispersas, para obtener las propiedades deseadas.

En igual forma, las cantidades de agregados de la pasta de cemento determinan las propiedades del concreto, que es un ejemplo típico de lo que es un material compuesto combinado. El objetivo es obtener una masa de concreto a un costo mínimo y, por lo tanto, el agregado constituye una fracción significativa del volumen. En este material compuesto es sabido que se obtiene concretos de alta resistencia a la compresión manejando las relaciones agua—cemento.

Muchas de estas fibras son residuales de otras producciones, como es el caso del bagazo (industria azucarera) y el henequén (industria de sogas y cordeles). Ambos tipos de fibras pueden utilizarse, convenientemente, en la producción de un material compuesto con matriz de cemento. A continuación se muestran las experiencias de Cuba en la confección de materiales compuestos empleando fibras vegetales residuales en matriz de cemento.

Desarrollo

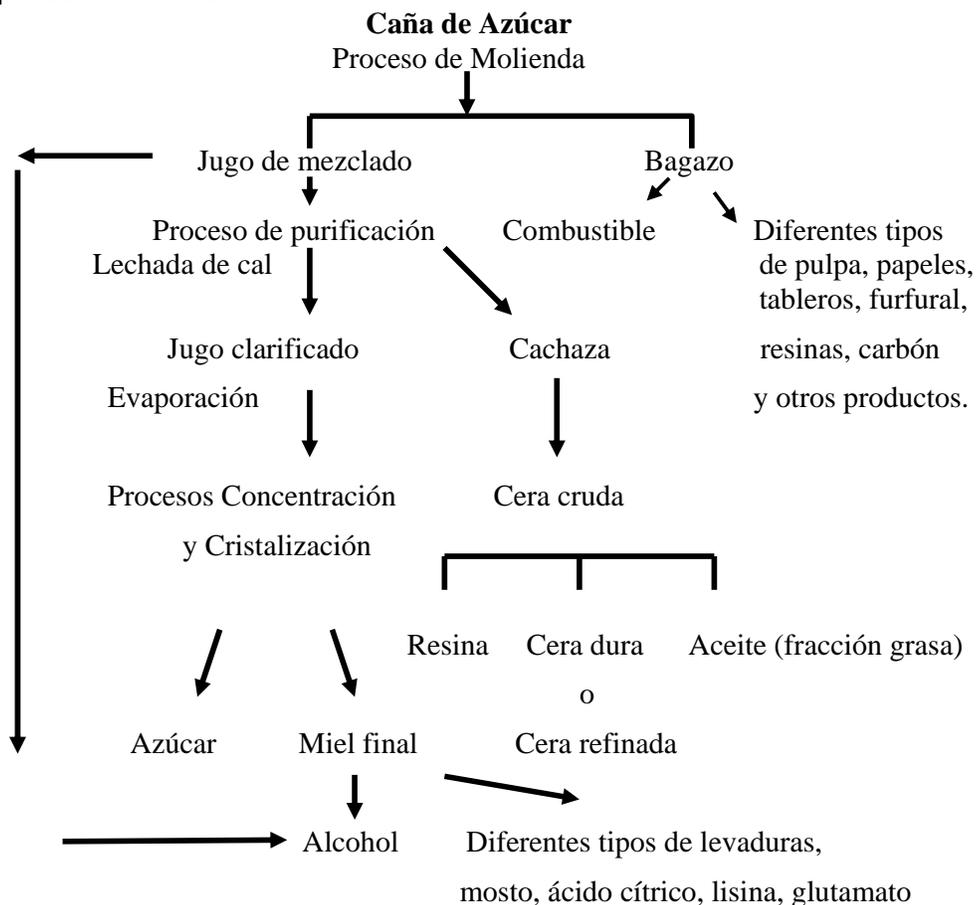
La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es originaria de Nueva Guinea; de allí se extendió a la India, a la Península Arábiga y de esta a España. Los españoles la llevaron a Santo Domingo y posteriormente Diego Velásquez la

introdujo en Cuba; en el siglo XVI. Es una gramínea con un alto contenido en azúcares. Se cultiva en zonas tropicales y subtropicales. La madurez la alcanza entre los 12 y 20 meses, en dependencia de la zona climática y de la variedad. El ciclo de siembra depende de las variedades, del suelo y del procedimiento de cosecha; se puede renovar la siembra después de cada cosecha o aprovechar hasta 10 cortes o más. La mecanización y la quema reducen los ciclos. La forma típica de sembrado es por estacas.

La planta puede crecer hasta superar los dos metros de altura; el tallo llega a tener una gran diversidad de formas, ya sea por el diámetro del mismo, o por la cantidad de nudos que puede presentar. En algunas variedades estos últimos son muy abundantes, encontrándose muy juntos el uno del otro. La corteza de la misma es muy resistente, mecánicamente y a la desecación pues, aparte de la epidermis, tiene un recubrimiento de cera vegetal. Como el resto de las gramíneas, posee un sistema radicular carente de raíz principal.

A partir del siglo XIX, con la Revolución Industrial, comenzó un gran desarrollo tecnológico de esta industria de la cual se obtienen varios subproductos. Los obtenidos durante la cosecha son: cogollo, hojas, paja y otros resultantes del proceso industrial como bagazo, melazas finales y cachaza. Por cada tonelada de caña se pueden obtener 120 kg. de azúcar, 38 kg. de miel final, 36 kg. de cachaza, 250 kg. de bagazo húmedo, 60 kg. de paja y hojas y 100 kg. de cogollo y el resto es agua.

En la Fig.1 se muestra el esquema de procesamiento de la caña de azúcar y los productos obtenidos.

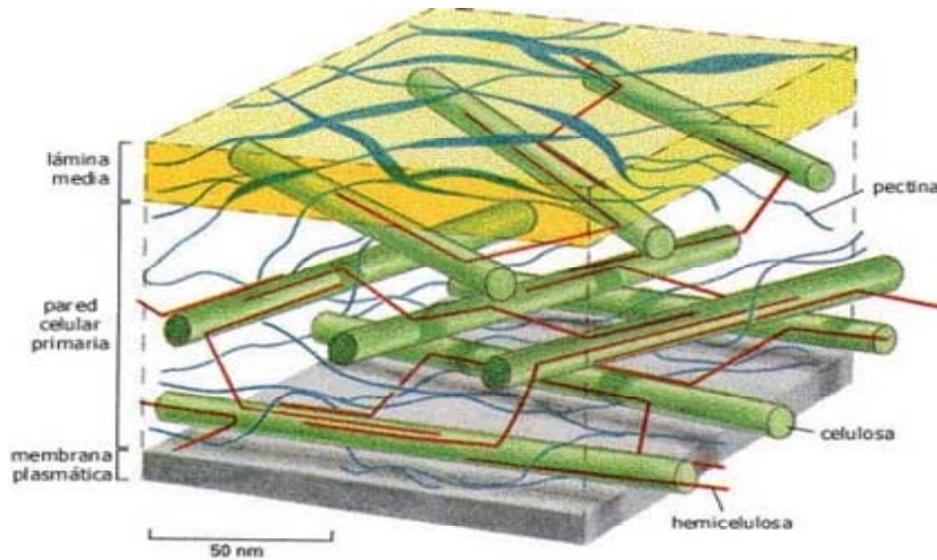


monosódico y otros productos.

Fig.1 Esquema de procesamiento de la caña de azúcar

El bagazo es el residuo del tallo o cuerpo de la caña de azúcar que queda después que se ha extraído el jugo, en el molino. Este residuo, separado después de la extracción del jugo de la caña de azúcar, representa el 12-14 % de la materia seca de la caña y es el principal subproducto de la industria azucarera (Pandey y col., 2000). Por cada 100 t de caña procesada para la producción de azúcar se obtiene alrededor de 28 t de bagazo y 20 t de otros residuos agrícolas (Suárez, 1994; Gálvez, 2000; Valdés, 1989). Tras ser molida la caña queda un material, el bagazo integral, formado por fibras de corteza (50 % del producto seco), parénquima (30 %), vasos (15 %), epidermis (5 %).

El bagazo está compuesto básicamente por celulosa (Fig. 3), hemicelulosa, lignina (Fig. 4) y otros materiales. La celulosa y la hemicelulosa son las principales fracciones, su combinación es la holocelulosa. En el bagazo las más abundantes son del tipo D-xilanas (Saavedra, y col., 1086). La lignina del bagazo está menos polimerizada que la de la madera, es más reactiva y se ubica en las capas externas de la pared celular. (Fig. 2).



Porción de pared primaria de un vegetal que muestra las dos mayores redes de polisacáridos

Fig.2. Estructura de la pared celular

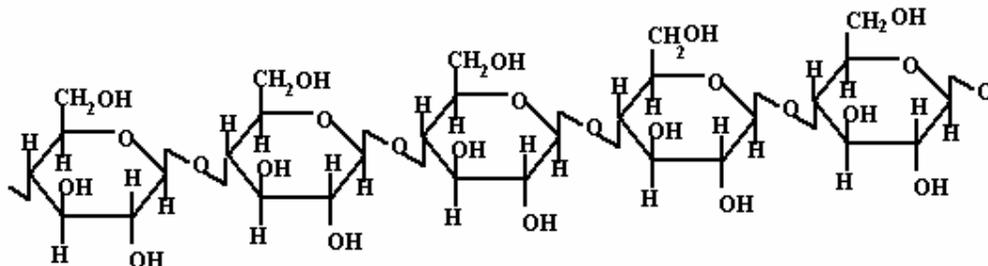


Fig. 3 Estructura de la celulosa

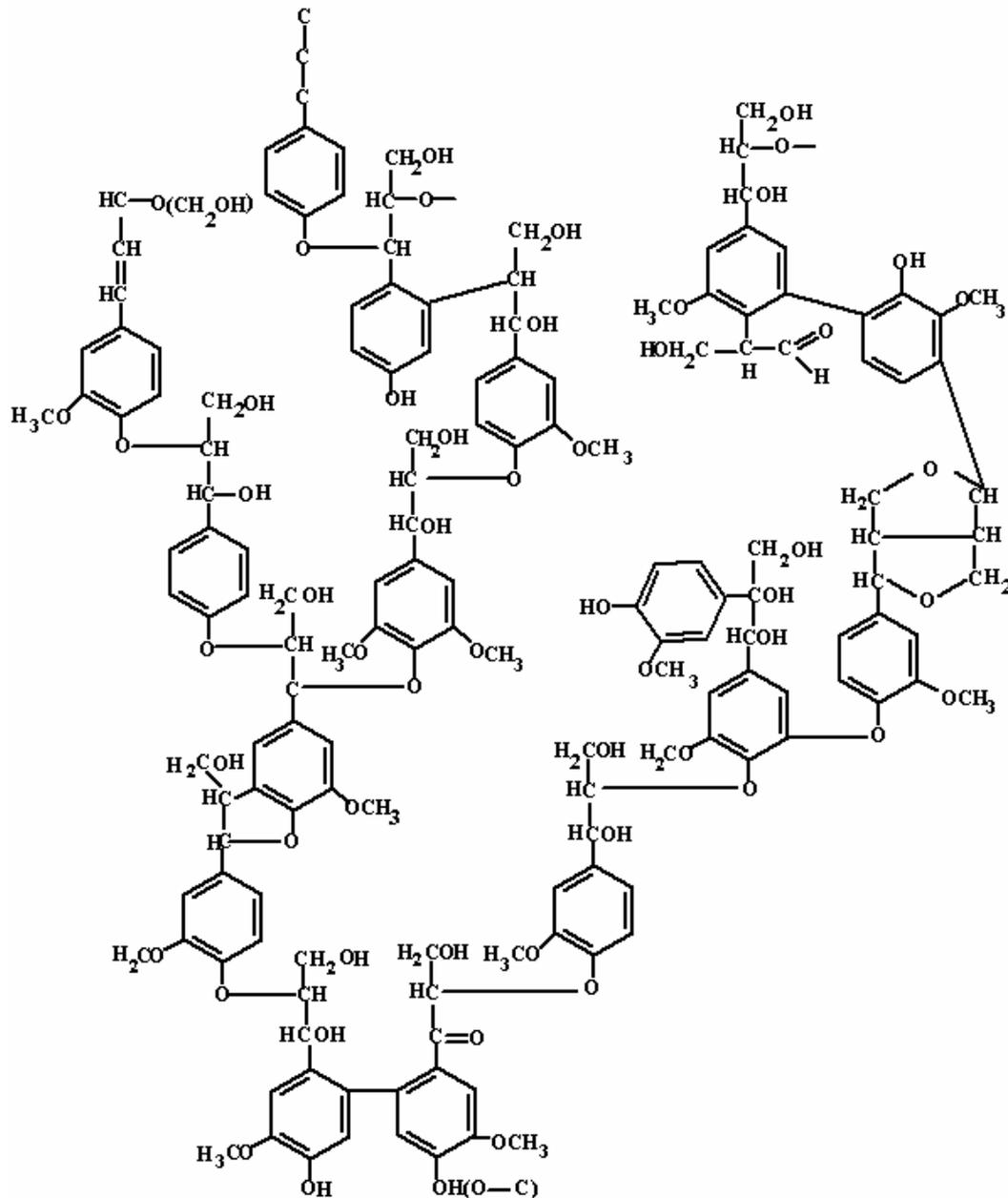


Fig. 4. Estructura de la lignina

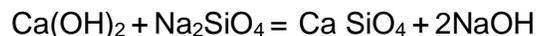
El contenido en fibra del bagazo seco es aproximadamente un 60 %; el resto es medula, finos, tierra y sólidos solubles.

El bagazo y los residuos de la cosecha de la caña de azúcar contienen alrededor de un 70 % de carbohidratos. El bagazo contiene 41-52 % de celulosa, 25-30 % de pentosanas y 18-25 % de lignina; por lo que su composición química está más cercana a la de las maderas duras que a la de las maderas blandas (Martín y col., 1988; Noa y col., 1991; Gastón y col., 2000; Pandey, y col., 2000).

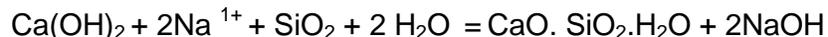
Se ha encontrado que el bagazo puede ser empleado en más de 40 aplicaciones diferentes (Triana y col., 1990). Puede ser utilizado para generar electricidad (Sharma y col., 1999; Kilicaslan y col., 1999), así como otros productos entre los que se encuentran pulpa de papel para periódicos (Villamil y col., 2000), la cual también se utiliza, combinada con otras sustancias, en la confección de tableros (Carvajal y col., 2000), producción de alimentos para el ganado (Pessoa y col., 1996; Villar y col., 2000).

En Cuba, se emplea el 8-10 % como materia prima (Valdés, y col., 2000). De este porcentaje, el 41 % se emplea en la industria de la pulpa de papel, el 40 % como alimento animal y el 19 % en la producción de tableros (Noa y col., 1991). En el mundo, el reemplazo de la madera por razones de conservación de los bosques, el propósito de lograr mayor resistencia, durabilidad y economía, ha obligado al estudio de múltiples soluciones. Un ejemplo de ello resulta la solución de cubiertas y entrepisos hechos totalmente de tableros de bagazo-cemento, tomando como referencia los paneles de madera-cemento que se emplean mundialmente, a gran escala. Esta producción se inició en 1985. En el periodo 1987-1990 fueron construidos prototipos de paneles de viviendas y otros, los que fueron ejecutados para comprobar la resistencia al intemperismo y su vida útil. Pese a los avances hasta 1990, las investigaciones con el bagazo-cemento, fueron perdiendo sistematicidad y llegaron a detenerse totalmente. A estos tableros de bagazo-cemento se adicionaba otros componentes como el silicato de sodio. (de la Rosa, 2000)

El silicato de sodio es un bloqueador. Este compuesto reacciona con la portlandita Ca(OH)_2 y forma el silicato de calcio (Ca SiO_4), insoluble en agua, el cual en las cercanías de la fibra, actúa como una barrera respecto al medio agresivo del cemento.



Se plantea que en realidad la reacción es de la siguiente forma:



Otro residuo en el procesamiento de la caña (Fig. 1), tras la filtración del jugo de caña en la producción de azúcares, es la cachaza, cuyo principal destino es la extracción y el refinado de cera.

También en la molienda, parte de la cera de caña queda retenida en el bagazo y otra parte; un 40%, pasa al jugo, de donde es extraída en el proceso de clarificación. La cera se encuentra cerca de los nódulos del tallo, en la cutícula y constituye aproximadamente el 0,1% del peso de la planta.

Desde el punto de vista químico, el uso del término cera es bastante confuso, ya que da a entender un estado físico más que un compuesto químico, así una cera comercial puede ser una grasa, un hidrocarburo o un producto cuya composición se acerca al de la cera verdadera por definición química. La misma está compuesta por ésteres de ácidos grasos superiores con un alcohol monohidroxílico de alta masa molar (García, *et al.*; 1986).

La cera cruda de caña (Blanco, 1980) contiene 35,5 % de ácidos y 60 % de materia no saponificable. Los ácidos grasos comprenden 20 % de ácidos volátiles, 20 % de ácidos grasos solubles en NaCO_3H , y estos a su vez, están constituidos por 22 % de hidroxiacidos y 56 % de ácidos grasos normales con la siguiente composición: 5,8 % de oleico, 2 % de linólico, 24,5 % de ácidos de 14 átomos a 24 átomos de carbono y 68,2 % de ácidos de 28 átomos a 30

átomos de carbono; también hay presente una pequeña cantidad de ácidos de 20 a 27 átomos de carbono.

La materia no saponificable contiene 2,7 % de hidrocarburos, 72,1 % de alcoholes, de los cuales la mayor parte es de alcohol mercílico y 17,1 % de esteroides de los que se han aislado estigmasterol y sitosterol.

Se puede obtener 3 fracciones de la cera cruda (Blanco, 1980):

Cera dura o refinada.....	41,0 % (55 % de ésteres, 8 % de ácidos libres, 10 % de alcoholes libres, 25 % de aldehídos y cetonas, y 2 % de hidrocarburos).
Aceite	39,8 % (71 % ácidos grasos, 23 % materia no Saponificables (hidroxiácidos, alcoholes y esteroides) y 6% glicerina.
Resina	17,6 % (poliésteres de oxiácidos y sales principalmente de calcio y magnesio.
Impurezas	1,5 %

Los compuestos saponificables son (ácidos grasos y ésteres) e insaponificables (alcoholes, aldehídos, cetonas y parafinas).

Se realizó un estudio (Evora, y col., 1987) de la composición de las ceras de distinta procedencia del proceso de fabricación de azúcar, mediante espectroscopia Infrarroja (IR) y otras determinaciones como medidas de la temperatura de fusión, índice de acidez e índice de saponificación y el fraccionamiento con diferentes disolventes, cuya composición es semejante a la obtenida por Blanco en 1980.

La resina está constituida, por una estructura de poliéster que se ha desarrollado a partir de monómeros céreos que tienen grupos funcionales tanto ácidos como alcohólicos. La polimerización y formación de sales de metales alcalinos y alcalinotérreos comienza en la planta viviente y está influida, por las condiciones del proceso del guarapo, cachaza y tratamiento térmico, durante la extracción de cera cruda con heptano. Es un compuesto sólido, de color negro, con temperatura de fusión entre 200 y 300 °C. (García, 1986). Sin embargo, esta temperatura de fusión se hace mas baja en dependencia de los componentes céreos que contenga.

Actualmente, en la Universidad de Matanzas se desarrolla investigaciones sobre la reutilización de diferentes residuales de la industria azucarera, (bagazo, cera y resina de caña). Entre estas aplicaciones se encuentra la confección de morteros formados por un material compuesto de fibras de bagazo impregnadas con una mezcla de cera y resina de caña. Los componentes de la cera y la resina son hidrófobos, y evitan la acción del agua alcalina contenida en los poros del cemento sobre las fibras, lo que trae consigo el mejoramiento de la durabilidad de las fibras, las cuales se distribuyen al azar en una matriz de cemento.

En el experimento se emplearon fibras de bagazo desmedulado, con $\text{pol}=1,62$ provenientes del Complejo Agroindustrial "Mario Muñoz", y cera y resina de caña producidas en la Planta de Cera de Ciego de Ávila.

Las fibras de bagazo se seleccionaron a simple vista, buscando uniformidad;; luego se cortaron a una longitud de 2 cm.

Se prepararon, como sustancias impregnadoras, mezclas de 100 g de cera y resina en diferentes proporciones.

1. 100 % de cera
2. 90 % de cera y 10 % de resina
3. 80 % de cera y 20 % de resina
4. 70 % de cera y 30 % de resina
5. 60 % de cera y 40 % de resina
6. 50 % de cera y resina
7. 40 % de cera y 60 % de resina
8. 30 % de cera y 70 % de resina
9. 20 % de cera y 80 % de resina
10. 10 % de cera y 90 % de resina
11. 100 % de resina

Se hicieron varios ensayos hasta obtener una porción de las mezclas que se disolviera en un volumen dado de xileno utilizado como disolvente. Se encontró que la relación óptima de cera-resina fue de 10:90 de donde se tomaron 63 g y se disolvieron en 250 mL del disolvente. Las disoluciones se homogenizaron con agitación, y se procedió a la impregnación de las fibras.

Cada muestra fue sumergida totalmente en un volumen de disolución durante 15 min, manteniendo la temperatura a 60 ° C. Después de este tiempo, las fibras se secaron a temperatura ambiente sobre papel de filtro durante 24 h.

Se utilizó un equipo para sombreado SPUTTER COATER modelo SC 500 marca BIO RAD y un microscopio electrónico de barrido HITACHI 4100-FE. Las muestras en el microscopio electrónico se fijaron con carbono coloidal. Para preparar las fibras del mortero, se disolvió el cemento en disolución de ácido clorhídrico (HCl) al 15 %, durante 3 días. Se utilizó diferentes aumentos, y detector de electrones secundarios. Se tomaron imágenes del microscopio, electrónico de barrido de la superficie exterior de las fibras.

Se pudo comprobar, a través de las imágenes del microscopio electrónico, la existencia de una fina capa superficial, compuesta fundamentalmente por los compuestos orgánicos de cadena larga, los cuales son hidrófobos, formándose también, en este caso, las sales de calcio de los ácidos orgánicos, los cuales son insolubles en medio acuoso.

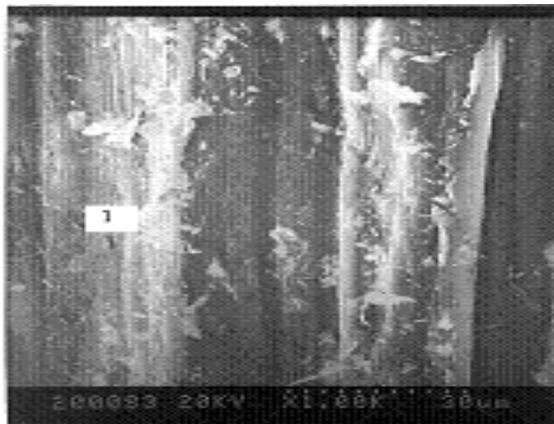


Fig.5. Imagen del microscopio electrónico del exterior de la fibra Bagazo

impregnada con Cera/ Resina (10/ 90) e incorporada a mortero. Detector de electrones secundarios 5000X

Se prepararon morteros con Cemento gris P-350, arena sílice no normalizada, agua y fibras impregnadas y sin tratar.

Las dosis empleadas para cada muestra fueron de 450,00 g de cemento y 1350,00 g de arena. Esto representó una dosificación gravimétrica de 1:3. Se emplearon 225 mL de agua y una dosis de fibras de 3 kg /m³.

Todos los materiales anteriores, debidamente pesados, fueron mezclados en una amasadora Maruto con recipiente de acero inoxidable. La mezcla se efectuó en seco, durante 30 segundos, utilizando la velocidad lenta. Seguidamente se añadió la fibra desmenuzada durante 30 segundos. Después, se agregó el agua, lentamente, mezclándose durante dos minutos aproximadamente.

Con la mezcla ya lista se llenaron los moldes de las briquetas hasta la mitad y se compactaron durante un minuto en una compactadora Maruto. Seguidamente se llenaron los compartimientos del molde. Cada molde, después de desmontado de la apisonadora, fue enrasado con una regla metálica de sección triangular. Pasadas las 24 horas se extrajeron las briquetas y se sometieron a curado durante 28 días bajo agua, para que las posibles partículas de cemento que quedaran sin reaccionar lo hicieran en ese ambiente húmedo y a temperatura ambiente. En total se prepararon 36 muestras por el procedimiento establecido en la norma NC 054-106-1978.

La resistencia se determinó ejerciendo esfuerzos de compresión sobre una sección de acero, de 46 x 40 mm, debidamente colocada sobre las dos caras laterales de la mitad de cada una de las briquetas.

El conjunto se colocó entre dos platos de una prensa hidráulica a la que se le aplicó, lentamente, una carga a velocidad constante hasta que se produjo la rotura.



Fig. 6. Valores medios de resistencia a compresión en morteros con fibras de bagazo impregnadas con mezclas de cera y resina de caña a los 28 días

Al efectuar el ensayo de resistencia a la compresión se observó que los mejores resultados se obtuvieron con la muestra 10 (Fig, 6), en la cual la composición del recubrimiento fue superior en resina, lo que aporta una superficie homogénea e impermeable al agua, actuando como una barrera entre el medio alcalino del cemento y los componentes orgánicos de la fibra. Sin embargo, se observó que estas fibras permanecían hinchadas durante mucho tiempo, debido al gran contenido de agua que presentaban y que el fraguado del cemento fue lento, como consecuencia de la presencia de los azúcares residuales adheridos a las fibras.

Se pudo hacer algunas observaciones en las muestras, después del ensayo de resistencia a la compresión. Los fragmentos de las muestras rotas quedaron unidos entre sí por las fibras. Al separar los mismos, se apreció que las fibras de bagazo de las muestras impregnadas, con un alto porcentaje de cera, salían de la matriz sin dificultad y sin quebrarse, mientras la matriz estuviese húmeda. Estos resultados demuestran que el recubrimiento que conservaba la fibra, permitió el deslizamiento de las mismas al debilitar la adherencia entre los elementos. En las muestras con fibras impregnadas con mayor proporción de resina, aún estando húmeda la matriz, se necesitó en algunos casos, partir las fibras para separar los fragmentos que estaban unidas a la matriz.

Al romper las muestras se pudo ver el estado de las fibras, algunas de las que tenían un gran porcentaje de cera habían perdido gran parte del recubrimiento. Las fibras se encontraron fuertemente unidas a la matriz y orientadas en todas direcciones aportando un refuerzo isótropo.

Conclusiones

1. Tanto en la confección de tableros bagazo-cemento, como en morteros de bagazo-cemento es necesario elevar la durabilidad de las fibras de bagazo con el empleo de sustancias bloqueadoras o hidrófobas que inhiban la acción del medio agresivo del cemento, lo cual debilita la fibra vegetal.
2. Los resultados obtenidos con el material compuesto de fibras de bagazo impregnadas con la disolución 10 (10 % de cera y 90 % de resina), dieron los mejores resultados, en cuanto a las propiedades mecánicas al nivel de laboratorio, por lo cual deben llevarse a escala de planta piloto

Referencias bibliográficas.

Blanco, G. (1980). Cera de cachaza. Los derivados de la caña de azúcar. E. C. Técnica. La Habana: 421-429.

Carvajal, O., M. Serrantes, et al. (2000). Bagasse particle boards. La Habana, s/e.

De la Rosa Arocha, W. (2000). Solución de cubiertas y entrepisos con bagazo-cemento. Alternativa para las viviendas de los productores cañeros. Revista Cañaveral. **Volumen 5**: 57-58.

Evora Larios M., D. P., M., Valentín Rodríguez, I. (1987). Estudio de las ceras en la industria azucarera. Revista Centro Azúcar. **Año 14 (4)**: 19-29.

García, A. G., J. L. Rodríguez, et al. (1986). Producción de cera y grasas a partir de cachaza. La industria de los derivados de la caña de azúcar. La Habana, Editorial científico técnica: 554-576.

Gastón C., R. Bambanaste, Correa, J., Alfonso, G., Herryman, M., (2000). Bagazo. Manual de los derivados de la caña de azúcar. La Habana, Cuba: 31-43.

Kilicaslan, I., H. I. Sarac, et al. (1999). "Sugar cane as an alternative energy source for Turkey." Energy Conversion and Management **40(s/n)**: 1-11.

Noa, H., J. Zegarra, et al. (1991). La diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. México, GEPLACEA

Martín, C. and A. V. Obolenskaja (1988). Khimitcheskij analiz bagassy kharnogo trostnika y polutchenje dioksan-lignina. Leningrado, Kafedra Khimii Drevesiny. Leso-tekhnicheskaja Akademija.

Pandey, A. and C. R. Soccol (2000). "Economic utilization of crop residues for value addition: a futuristic approach." J. Sci. Ind **59(s/n)**: 2-22.

Pessoa, A., I. M. de Mancilha, et al. (1997). "Evaluation of sugarcane hemicellulose hydrolysate for cultivation of yeasts and filamentous fungi." J. Ind. Microbiol. Biotechnol **18(s/n)**: 360-363.

Sharma, M. P. and J. D. Sharma (1999). "Bagasse-based cogeneration system for Indian sugar mills." Renewable Energy **16(s/n)**: 1-4.

Saavedra F., C. D. (1986). Las hemicelulosas del bagazo y la caña de azúcar. Estudio bibliográfico. Revista ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar. No 1. Volumen XX: 30-35.

Sarigaphuti, M., S. P. Shah, et al. (1993). "Shrinkage cracking and durability characteristics of cellulose fiber reinforced concrete."

Suárez, R. (1994). Caña de azúcar: medio ambiente y desarrollo. Seminario Internacional Generación comercial de energía eléctrica en la agricultura cañera, Guatemala.

Triana, O., M. Leonard, et al. (1990). Atlas del bagazo de la caña de azúcar.

México, GEPLACEA.

Valdés, J. L., Méndez J., Rodríguez, M.E., Sosa, P. (1989). Calidad de los tableros de partículas de bagazo en Cuba. Revista ICIDCA. XXIII: 44-47.

Valdés, A., O. Almazán, et al. (2000). "Contribución de la biomasa cañera al incremento del valor agregado de la producción azucarera." Int Sugar J 102(s/n): 551-555.

Villamil, G. and M. Herryman (2000). Manual de los derivados de la caña de azúcar. La Habana, s/e.

Villar, J., R. Cañete, et al. (2000). "Bagazo hidrolizado: una planta industrial." International Sugar Journal 102(s/n): 165-167.