

## REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE TIPO ORGANICO, EN LA ELABORACIÓN DE COMPOSITES SOSTENIBLES Y ECO-EFICIENTES

<sup>1</sup>Medina Alvarado, Rosa; <sup>2</sup>Burneo Valdivieso, Xavier; <sup>3</sup>Hernández-Olivares, Francisco; <sup>4</sup>Zuñiga Suárez, Alonso

<sup>1 2</sup>Departamento de Arquitectura y Artes.

<sup>4</sup>Departamento Ingeniería en Minas e Ingeniería Civil

<sup>1 2 4</sup>Universidad Técnica Particular de Loja. San Cayetano Alto, calle Marcelino Champagnat s/n, Loja (Ecuador)

<sup>3</sup>Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Juan de Herrera, 4. 28040 Madrid (España)

e-mail: <sup>1</sup>remedina@utpl.edu.ec; <sup>2</sup>xeburneo@utpl.edu.ec; <sup>3</sup>f.hernandez@upm.es

### RESUMEN

La tradición global de la construcción está seriamente afectada por la escasez de materiales provenientes de la naturaleza, lo que estimula el desarrollo de tecnologías y sistemas constructivos relacionados a la reutilización de residuos de tipo orgánico. En Ecuador se destinó una superficie de 106.930 ha en 2012 a plantaciones de caña de azúcar, con una producción de 7,38 Mt (el 7,5% en la provincia de Loja) [1], que producen como residuo orgánico bagazo de caña de azúcar, una parte importante en molinos de productores artesanales. Aproximadamente el 50% se emplea como combustible, abono y alimento del ganado, el resto se acumula como desecho, con problemas de salubridad. Se propone en esta comunicación la valorización y uso de este residuo como componente de materiales artesanales de construcción. Se describe el diseño de materiales compuestos, y medidas de sus propiedades físicas y mecánicas, apuntando a elementos que combinen técnica, normas de especificación y producción artesanal que permitan generar una producción para viviendas de bajo costo en el sector de la provincia de Loja.

Este trabajo parte de una investigación en curso, desarrollado por profesores de la Universidad Técnica Particular de Loja (Ecuador) y la Universidad Politécnica de Madrid (España), dividida en dos fases: en la primera se hace un análisis en laboratorio de residuos orgánicos vegetales provenientes de la provincia de Loja; en la segunda y en parte simultánea, se proponen y construyen prototipos de elementos arquitectónicos, con los materiales investigados.

De los primeros resultados de la investigación se han obtenido propiedades mecánicas y físicas de composites con bagazo, cáscara de arroz, cascarilla de café, en matrices de yeso, y cemento, con adiciones de cenizas de estos materiales, así como la incidencia en las medidas de absorción y succión capilar de estas muestras de materiales compuestos, constatando la obtención efectiva de materiales con posibles aplicaciones constructivas en edificación.

En la segunda fase se está experimentando con la fabricación y uso constructivo de placas y tableros sándwich a escala 1:1 determinando combinaciones, modulación, sistemas de anclaje y su resistencia, obteniendo valores prometedores en la tenacidad. También se han realizado diferentes tratamientos a los materiales (fibras orgánicas y matrices) para que no se vean afectados por agentes externos.

Se concluye que los composites fabricados con adiciones orgánicas vegetales de bagazo, con y sin sus cenizas en matrices de yeso permiten una reutilización de materiales de residuos, son sostenibles y aportan soluciones eco-eficientes para la ejecución de proyectos arquitectónicos.

**Keywords:** composites, residuos orgánicos vegetales, bagazo, materiales sostenibles.

## 1.- Introducción

El ámbito industrial genera una serie de residuos de fácil reciclado y reutilización, por ejemplo, los metales siderúrgicos, que pueden volver a fundirse para fabricar nuevos productos siderúrgicos de semejantes propiedades que los originales [2]. Sin embargo, otros residuos son de difícil reutilización o valorización, por ejemplo la cáscara de café, de arroz y el bagazo de caña de azúcar (se estima que una tonelada de caña de azúcar genera 280 kg de bagazo [3]) cuya acumulación en vertedero llega a ser en algunos casos una fuente de problemas de salubridad y seguridad: plagas y malos olores, que afecta también a la vinaza, residuo generado en la obtención de etanol, y que es un líquido de color marrón, con un gran contenido de sólidos suspendidos. La combustión es una opción habitual en las industrias azucareras, y la última opción en general, ya que genera gases de efecto invernadero, aunque las cenizas de bagazo calcinadas a altas temperaturas tienen elevadas propiedades puzolánicas [3], como también tienen las cenizas de arroz [5]. El objetivo principal de esta investigación es doble: lograr la desaparición total de estos vertederos de residuos vegetales y aprovechar las propiedades de las fibras de caña de azúcar, arroz y café, y el carácter puzolánico de sus cenizas, en la fabricación de nuevos materiales de construcción con aplicaciones principalmente en edificación, en ámbitos locales próximos a las zonas de generación de estos residuos orgánicos vegetales y con técnicas sostenibles.

Tras explorar diversos tipos de productos ecoeficientes y elementos constructivos, para lograr la segunda parte del objetivo se ha optado por desarrollar una gama de paneles y tableros de materiales compuestos de matriz combinada yeso o cemento, con adiciones de cenizas de bagazo por su potencial puzolánico. Como refuerzos se incorporan diversas fracciones volumétricas de fibras cortas del bagazo, previamente tratado para mejorar su compatibilidad con las matrices indicadas, y se analizan sus propiedades físicas, mecánicas y durabilidad.

Los materiales basados en cementos y yesos como conglomerantes son frágiles y quebradizos, pero al incorporarles fibras cortas e hilos largos vegetales mejoran sus propiedades mecánicas y se amplían sus prestaciones constructivas [6-7]. Se estableció una metodología experimental de ensayo y error, en laboratorio y en prototipo sencillo de vivienda, para determinar las proporciones y procesos de preparación de componentes, las técnicas de mezclado y de dar forma constructiva a estos nuevos materiales compuestos. Una vez determinadas las composiciones óptimas se midieron las principales propiedades físicas y mecánicas, y están en curso actualmente ensayos de durabilidad, también en laboratorio y en el prototipo construido, sobre paneles y tableros fabricados artesanalmente con las dosificaciones óptimas de sus componentes previamente determinadas.

Para alcanzar estos objetivos, se establecieron dos fases: en la primera se organizó un equipo con investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM)-España e investigadores de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL)-Ecuador y estudiantes de la Titulación de Arquitectura de la UTPL, que realizó la caracterización física, química y mecánica de los nuevos materiales compuestos y de sus componentes, sobre probetas normalizadas ensayadas en laboratorio, para lo que se hicieron los ensayos técnicos de las diferentes composiciones, para la posterior elaboración de los prototipos de los elementos constructivos.

La segunda fase es la de diseño y realización de prototipos de paneles compuestos conglomerante - fibras vegetales y tableros de fibras vegetales, actualmente en desarrollo, generando modelos que utilizan elementos constructivos fabricados con estos nuevos materiales, mediante diseño paramétrico y fabricación digital, determinando así su mejor aplicación constructiva urbano - arquitectónica.

## 2.- Producción de caña de azúcar y su residuo (el bagazo)

En Ecuador se destinó en 2012 una superficie total de 106.930 ha a plantaciones de caña de azúcar [1], con una producción estimada en 7,38 millones de toneladas, de la que el 7,5% corresponde a la provincia de Loja, donde se encuentra la UTPL, contabilizando los ingenios de explotación que constituyen las grandes cadenas azucareras, los mismos que se encuentran destinados a la producción de etanol, panela y alcohol artesanal, producción que en estos últimos años ha sido elevada y muy satisfactoria, generando gran cantidad de empleo directo.

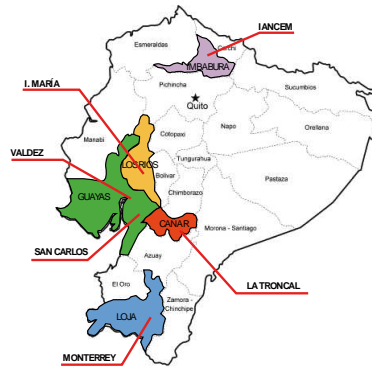


Fig. 1 “Ubicación de ingenios azucareros en Ecuador”. [8] (Modificado por autores)

En la provincia de Loja-Ecuador, la producción de cultivos de caña de azúcar se concentra principalmente en las zonas de Malacatos, Vilcabamba y San Pedro de Vilcabamba, donde se encuentran pequeñas fábricas productoras de panela, miel y cachaza para uso de los habitantes del sector; sin embargo la industria más importante en el sur del Ecuador es el ingenio azucarero “MONTERREY” ubicado en Catamayo, a 36 km de la ciudad de Loja, considerado uno de los más importante en el país por su producción y uso de modernas maquinarias que evitan la contaminación del medio ambiente. Esta fábrica realiza la siembra, la cosecha, la producción de azúcar y la comercialización a nivel nacional, internacional e inclusive con pequeños comerciantes.

Sin embargo esta importante agroindustria azucarera, ha producido en el país no solo beneficios en el sector económico, sino también gran cantidad de residuos agroindustriales (principalmente bagazo) en las pequeñas molindas, que se acumulan en grandes cantidades generando la aparición de bacterias e insectos, que ponen en riesgo la salud de las personas que trabajan en estas industrias del azúcar y sus derivados [9].

### 2.1.- El bagazo de caña de azúcar

El bagazo de la caña de azúcar, es el residuo fibroso que queda de la caña después de ser exprimida y de pasar por un proceso de extracción. En las referencias se pueden consultar las propiedades, las características organolépticas más destacables de sus principales componentes y sus principales usos.

### 2.2.- Propiedades físicas y químicas del bagazo

Las propiedades físicas y químicas del bagazo se encuentran en la literatura científica [10-11]. En cuanto a su composición, el bagazo contiene celulosa, hemicelulosa y lignina como principales polímeros naturales. Presenta además pequeñas cantidades de otros compuestos clasificados como componentes minoritarios, solubles en solventes orgánicos, se describe en las anteriores referencias.

### **2.3.- Ciclo de vida del bagazo**

El tiempo de duración del bagazo desde su prensado para la extracción del azúcar hasta la aparición de agentes biológicos (moho), depende principalmente de los métodos de almacenamiento y secado. Si el material no es sometido a ningún método de almacenamiento en condiciones ambientales adecuadas y se deja a la intemperie en contacto con la lluvia y el sol inicia un proceso de pudrición a partir de 7 - 10 días desde el prensado extractivo de azúcar, debido principalmente a la sacarosa residual que retiene [12].

En las fábricas (moliendas) artesanales, el bagazo se acumula de forma incontrolada, utilizándose como material combustible para el funcionamiento de la maquinaria (trapiche) para la elaboración de la panela, o como abono para las plantaciones de caña. El sobrante de estas dos aplicaciones se abandona para que llegue al punto de descomposición, generando la aparición de insectos e insalubridad no solo para los trabajadores de las moliendas sino también para los habitantes del sector, ocasionando en muchos casos cierres de estas moliendas tradicionales.

### **3.- Paneles y tableros prefabricados**

Los diversos tipos constructivos de paneles y placas de cemento y de yeso con refuerzos de fibras de bagazo que se han seleccionado para la investigación están inspirados en los tableros derivados de la madera, tableros de partículas, o tableros aglomerados, fabricados a partir de partículas de madera triturada (hojuelas, astillas, virutas), tableros de fibras de densidad media (MDF) y tableros de virutas planas orientadas (OSB). También se han fabricado y explorado las propiedades de elementos constructivos sandwich con núcleo aligerado de espumas rígidas y pieles de cáscara compuestas de yeso o de cemento con cenizas y reforzados con fibras cortas de bagazo [13-15]. Estos paneles y tableros presentan versatilidad constructiva, que los hace adecuados para aplicaciones en elementos de fachada, particiones interiores, falsos techos e incluso en cubiertas, en pequeñas edificaciones residenciales de carácter rural, y son fácilmente aceptados por su facilidad de fabricación artesanal y la disponibilidad local de los materiales componentes. No obstante, también son elementos constructivos que se adaptan a sencillos procesos de industrialización, sin demasiada inversión en equipamiento.

## **4.- Fabricación de tableros**

### **4.1.- Materiales**

Para la realización de las probetas y tableros se ha utilizado los siguientes materiales: Cemento Tipo I para uso general (NTE INEN 152:2012) suministrado por Holcim de resistencia a compresión 30 MPa a 28 días. Hecho análisis de óxidos por fluorescencia de Rayos X (Equipo Bruker S1 Turbo<sup>SD</sup>, de la UTPL) se ha obtenido la siguiente composición (aplicando la fórmula de Bogue):  $C_3S = 59,48 \%$   $C_2S = 12,64 \%$   $C_3A = 9,65 \%$   $C_4AF = 14,39 \%$ . Yeso fino de construcción (NTE INEM 1685). Cal hidratada (NTE INEN 247:2010), contenido en CaO 62%, por fluorescencia de RX medido en el mismo equipo Bruker S1 Turbo de la UTPL. La fibra de bagazo ahumada se ha obtenido de depósitos de moliendas tradicionales de San Pedro de Vilcabamba; lavada en agua durante 24 horas para disolver la sacarosa, secada y separada de la médula. Se ha troceado y separado en fibras cortas de 0,5 cm a 6,0 cm de longitud para probetas pequeñas de laboratorio, y en fibras largas de 30 cm a 60 cm para los tableros y paneles. Se ha utilizado también ceniza de bagazo (52% de SiO<sub>2</sub>), horneado a media temperatura y ceniza de cáscara de arroz (62% de SiO<sub>2</sub>), calcinando cascarilla, tamizadas a granulometría fina, menor de 0,075 mm. Para mejorar la compatibilidad bagazo - conglomerantes inorgánicos, y eliminar

materia orgánica alterada, la fibra se ha tratado en lechada de cal hidratada durante tiempos de 1 hora a 24 horas, antes de fabricar las probetas, paneles y tableros.

## **4.2.- Metodología**

Dada la gran cantidad de bagazo de caña de azúcar que existe como residuo, se programó experimentar con diversos tipos de paneles de materiales compuestos y tableros, haciendo también probetas en laboratorio de una amplia gama dimensional:  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  y de otras dimensiones con menor espesor (2 cm) descritas más adelante para ensayos mecánicos a flexión, y de  $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$  para ensayos de rotura a compresión, entre otros. Los paneles también se han fabricado con diferentes dimensiones por razones de modulación de elementos constructivos en prototipo (desde  $15 \times 15 \times 2 \text{ cm}^3$  hasta  $60 \times 90 \times 3,5 \text{ cm}^3$  y  $60 \times 90 \times 5 \text{ cm}^3$  los tipo sándwich).

Se realizaron en primer lugar los tratamientos de la materia prima, y la medida en laboratorio de sus propiedades físicas (densidad, contenido en humedad, coeficiente de absorción de agua). Determinación de diferentes dosificaciones, comportamiento y reacción (fraguado, cohesión) del bagazo y los materiales conglomerantes (yeso con ceniza de bagazo, cemento con cenizas de bagazo, yeso, aditivos plastificantes y colas vegetales para mejorar el comportamiento ante la humedad e hídrico), obteniendo alternativas a los que se encuentran en el mercado y puedan ser utilizados a nivel arquitectónico. Estos tableros parten del concepto de su fácil elaboración, ya que no necesitan horneado, se elaboren artesanalmente y que no necesiten de gran tecnología para su elaboración, considerando que las personas del mismo sector los puedan construir y aplicarlos, a todo esto se suma evitar en un menor porcentaje la contaminación en el medio ambiente.

### **4.2.1.- Elaboración de probetas**

Dada la extensión de la investigación en curso, se presentan aquí solo un avance de resultados de algunos ensayos de laboratorio. El resto se aportará en sucesivas comunicaciones y artículos.

Para establecer las posibles aplicaciones constructivas de estos materiales compuestos, se ha tomado como referencia la Normativa Técnica Ecuatoriana INEN para la respectiva comparación con las prescripciones ahí establecidas. Se analiza que las muestras tipo elaboradas se ajusten a las especificaciones de esta normativa, para que puedan ser utilizadas en la construcción principalmente con fines no estructurales en solados, cubiertas, tabiquería y cerramientos.

Se desarrollaron diferentes tipos de probetas y paneles de cemento-bagazo, ceniza-bagazo, yeso-bagazo, fibra de bagazo-cola vegetal, y hasta unos tableros de pulpa de bagazo con resina de poliuretano, los mismos que luego de cumplir con el tiempo determinado de fraguado y secado, se sometieron a los ensayos de flexión, compresión, absorción de agua, capilaridad, fuego y perforación y resistencia a los anclajes. Se dosificó la relación de agua cemento en todas las muestras a 0,5 en peso. En los materiales fabricados con yeso y fibra se empleó una relación de agua/yeso variable entre 0,65 y 0,75. Las adiciones de cenizas a las muestras con cemento y yeso incorporaron un mínimo del 10% de cenizas en peso sobre el conglomerante. Se hicieron amasadas a mano y a máquina, pero finalmente se optó por el amasado a mano para conseguir introducir una mayor cantidad de fibra corta, y necesario en el caso de los tableros y paneles de grandes dimensiones, con mayores cantidades de fibra larga.

La elaboración de las probetas inició con el acopio de materiales: fibra de bagazo seca sin pulpa; pulpa seca, fibra de bagazo seca con pulpa. A partir de aquí, se hicieron medidas de granulometría de las cenizas de hogar de la combustión de las

fibras de bagazo que se utilizarán preferentemente como adiciones puzolánicas en las muestras que contengan cemento en la composición del conglomerante, determinando el porcentaje en peso.

Seguidamente se hizo una clasificación manual previa para separar las fibras de bagazo en fibras cortas de diferentes rangos de tamaños: 0-2 cm, 0-4 cm, etc., y fibras largas para refuerzo y armado, respectivamente, de materiales compuestos de matriz conglomerada: cemento o yeso.

Finalmente se confeccionaron moldes metálicos practicables, con las que se pudo comenzar a fabricar probetas de materiales compuestos de yeso, y cemento reforzados con fracciones volumétricas elevadas de fibras y cáscaras, tanto cortas como en el caso de bagazo y eventualmente, fibras de mayor longitud, aunque lógicamente limitadas a las dimensiones de los moldes. Además de las mezclas de conglomerantes de cemento y de yeso se hicieron también mezclas con cenizas de granulometría fina para evaluar su acción puzolánica con el cemento ordinario. Las probetas de yeso y cemento con fibra corta alcanzaron por este método adiciones de fibra entre el 7% y el 100% en peso sobre conglomerante seco.



Fig. 2 “Elaboración de probetas”.

Las probetas se desmoldan a las 24 horas de su ejecución. Durante ese tiempo, las muestras con conglomerantes hidráulicos o adiciones puzolánicas se cubrieron con un paño humedecido para evitar el secado inicial en las primeras fases de las reacciones de hidratación, y mejorar así el curado. Al desmoldar se retira el paño humedecido, para evaluar el desarrollo de resistencias en el ambiente del laboratorio, en condiciones normales de temperatura y humedad relativa (20-22 °C, 65% HR). Las muestras que contenían solo yeso se secaron finalizado el fraguado en estufa a 40°C hasta peso constante, a partir de las 48 horas de su realización.

#### 4.2.2.- Ensayos mecánicos

Evaluación del comportamiento a flexión, compresión: Estos fueron desarrollados de acuerdo con la norma NTE INEN 900 – ASTM 1185, sobre muestras con diferentes dosificaciones con los materiales de materia prima mencionados anteriormente, se utiliza una máquina de ensayos Versa Testter (flexión), y la prueba a compresión en la máquina ELE International Soiltest del Laboratorio de Materiales del Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil de la UTPL.

- Ensayo a compresión: Se realizan sobre probetas de 10x10x15 cm<sup>3</sup>, elaborados de forma manual, una vez llenados los moldes se niveló la superficie, y se dejó fraguar en molde durante 24 horas para posteriormente ser extraídos y culminar con el tiempo de curado y secado adecuado.
- Los ensayos a flexión se realizaron a tres puntos, para obtener las gráficas carga-flecha y posteriormente las de tensión-deformación en flexión. Se fabricaron probetas de 4x4x16 cm<sup>3</sup> y también (tabla 2) se extrajeron muestras de los paneles y tableros, de dimensiones variables: longitudes entre 11 cm y 14 cm, anchos entre 5 cm y 12 cm, gruesos de 1,5 cm, 2cm y 3 cm.
- Ensayo de tracción directa de las fibras de bagazo: Se seleccionaron varios tipos diferentes de fibras, y se agruparon en paquetes de diferente sección

para someterlos a tracción directa en la máquina de ensayos Versa Testter del laboratorio de materiales obteniéndose los datos de carga-alargamiento de todas las muestras preparadas (Fig. 5).

- Resistencia al anclaje: Las muestras seleccionadas se taladran con tornillo autorroscante, respetando las distancias que se detallan en los tipos de fijaciones y anclajes de tableros prefabricados (a 2cm del borde).

#### 4.2.3.- Ensayos de caracterización física

Se midió la densidad aparente del bagazo por métodos hídricos, con sobrepesos adicionales para lograr su completa inmersión en agua, obteniendo 0,19 g/cm<sup>3</sup> en promedio. Se obtuvieron otras propiedades físicas que no se aportan aquí para no extender la comunicación: contenido en humedad, absorción, succión capilar, porosidad.

Hinchamiento o entumecimiento de los materiales compuestos: Se realiza este ensayo para determinar las variaciones dimensionales en el espesor de la probeta después de su inmersión total en agua, durante 2 y 24 horas (NTE INEN 899).

$$H_t(\%) := \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100(\%) \quad (1)$$

Donde:

$H_t$  = Hinchamiento (%)

$t_1$  = Espesor de probeta previo a inmersión (mm)

$t_2$  = Espesor de probeta luego a inmersión (mm)

Resistencia al fuego: Se determinó de acuerdo con la norma NTE INEN 804 sometiendo a fuego directo una serie de placas seleccionadas. La norma referida establece dos clases resistentes, 1) F30 = Fuego de 30 minutos, para viviendas y 2) F60 = Fuego de 60 minutos, para edificios de uso no residencial. El instrumento que se utilizó para esta prueba, fue un soplete alimentado por gas licuado.

### 5.- Resultados y análisis

La tabla 1 presenta los resultados del comportamiento a compresión, de muestras ensayadas que cumplieron con las especificaciones de la Norma Ecuatoriana. De acuerdo, con la información de la tabla, se aprecia efectivamente que los composites analizados presentan un comportamiento incluso superior al propuesto en la Norma Ecuatoriana.

| MUESTRA | PESO (g) | Altura (cm) | Largo (cm) | Ancho (cm) | Carga Máx. (kg) | Resistencia compresión (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|----------|-------------|------------|------------|-----------------|--|
| Y2      | 1153,6   | 10          | 15         | 10         | 4212,4          | 28,08  |
| Y4      | 1138,1   | 10          | 15         | 10         | 3177,7          | 21,18  |
| Y5      | 1103,9   | 10          | 15         | 10         | 3660,6          | 24,4   |
| B2      | 1107,9   | 10          | 15         | 10         | 2815,5          | 26,76  |
| CN1     | 1400,6   | 10          | 15         | 10         | 2960,1          | 20   |

Tabla 1 “Resistencia a compresión”



Fig. 3 “Ensayo de rotura a compresión”

La resistencia a tracción de las fibras de bagazo medida en promedio fue de 135,0 MPa y su módulo de Young de 11,5 GPa, en coherencia con datos de la bibliografía [16], aunque hay una gran dispersión, tanto en la bibliografía como en las medidas realizadas en esta investigación (otros autores indican valores de la resistencia a tracción del bagazo de 30,9 MPa [17]).

Con relación a la resistencia a flexión, la tabla 2 resume las características de las probetas que cumplieron con la Norma Ecuatoriana, que determina un valor mínimo de 15 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a la flexión para que se admita la aplicación constructiva del correspondiente material. La resistencia a flexión es mayor en los elementos a base de yeso, debido a que este elemento es de rápido fraguado y más dúctil, resistiendo un poco más la deformación por la carga aplicada en el centro del tablero.



Fig. 4 “Ensayo de flexión”.



| CÓDIGO            | LARGO (cm) | ANCHO (cm) | ESPESOR (cm) | Peso (kg) | Carga Max. (N) | Resistencia flexión (N/mm <sup>2</sup> ) | Resistencia flexión (kg/cm <sup>2</sup> ) | Deformación (%) |
|-------------------|------------|------------|--------------|-----------|----------------|--|---|-----------------|
| y1                | 13,0       | 6,5        | 2,0          | 8,57      | 41,0           | 2,38                                     | 23,80                                     | 7,27            |
| y2                | 13,0       | 6,0        | 2,0          | 8,56      | 39,5           | 2,38                                     | 23,82                                     | 5,13            |
| y3                | 13,0       | 9,5        | 2,0          | 8,59      | 73,0           | 2,39                                     | 23,90                                     | 5,56            |
| YA1               | 13,5       | 8,0        | 1,5          | 9,83      | 31,5           | 2,73                                     | 27,34                                     | 5,67            |
| YA2               | 13,5       | 12,0       | 1,5          | 9,82      | 21,4           | 2,73                                     | 27,31                                     | 5,27            |
| YFI               | 14,0       | 5,0        | 2,0          | 8,55      | 15,5           | 2,38                                     | 23,76                                     | 1,54            |
| YF2               | 14,0       | 8,0        | 2,0          | 8,55      | 25,5           | 2,38                                     | 23,79                                     | 3,85            |
| YB1               | 13,5       | 5,0        | 3,0          | 8,62      | 108,0          | 2,40                                     | 23,98                                     | 4,86            |
| YB2               | 13,5       | 6,0        | 3,0          | 8,63      | 115,0          | 2,40                                     | 24,00                                     | 2,03            |
| YB3               | 13,5       | 12,0       | 3,0          | 9,80      | 200,0          | 0,33                                     | 3,34                                      | 6,89            |
| YB <sup>2</sup> 1 | 13,0       | 8,0        | 2,0          | 8,53      | 70,0           | 0,22                                     | 2,23                                      | 2,31            |
| YB <sup>2</sup> 2 | 11,0       | 6,5        | 2,0          | 8,59      | 70,0           | 2,39                                     | 23,89                                     | 6,05            |
| YB <sup>2</sup> 3 | 11,0       | 6,0        | 2,0          | 8,60      | 84,0           | 2,39                                     | 23,92                                     | 3,85            |
| YB <sup>2</sup> 4 | 13,0       | 5,0        | 2,0          | 8,53      | 45,0           | 2,38                                     | 23,83                                     | 1,62            |
| CNA1              | 13,5       | 12         | 2,0          | 9,84      | 49,0           | 2,74                                     | 27,38                                     | 2,03            |

Tabla 2 “Resistencia a flexión”.



Fig. 5 “Ensayo a tracción de fibras de bagazo”.

En la tabla 3 se incluyen los nombres y composición de las probetas descritas en los ensayos que se presentan en esta comunicación.

|  |
|--|
| Y1 a Y5: Yeso con bagazo (mezcla de fibra y pulpa). Adición de fibras en peso sobre yeso: desde un 24% al 100%. Tamaños de las fibras (0-2 cm). Espesor de las placas: Desde 1,5 cm a 3 cm. Y2 contiene 8% de cola vegetal. Agua(%)/yeso(%): 20/40, 12(+8cola)/52,13/70,16/43. |
| CN1- CN2: Ceniza con bagazo. Espesor 2 cm. CN1 mezcla de fibra y ceniza: (32%,32%,16%,20%: ceniza, bagazo, cola, agua). Bagazo: 0-2 cm. Sin pulpa. CN2 mezcla de fibra (con pulpa) y ceniza (48%,24%,8%,20%: %: ceniza, bagazo, cola, agua). Bagazo 0-2 cm con pulpa.          |
| C1 a C3: Cemento con bagazo. Adición de fibra y pulpa. Espesor de 1,5 a 3 cm. C1 (50%,10%,25%,15%: cemento,bondex,fibra,agua)fibra de 20mm a 50mm, C2(50%,30%,20%: cemento, fibra+pulpa,agua)fibra pulpa de 0 a 20 mm. C3 (24%,56%,20%: fibra y pulpa 0-1,5 mm y 20 mm.        |
| B1 y B2: Cemento, bagazo, bondex. Espesor 1,5 a 2 cm. B1 (20%,40%,20%,20%: cemento,bondex,fibra, agua) fibra 0,5 a 20 mm. B2   |

|   |
|---|
| (40%,10% 40%,20%: cemento,bondex,fibra, agua) fibra 20mm a 40 mm.   |
| P1 a P3: Fibra con resina de poliuretano. Espesor 1,5 cm a 2 cm. Composición: (80%,20%:fibra,PU) Tipos de adiciones: P1 fibra y pulpa 0,1mm a 30 mm; P2, pulpa, 0,1mm a 50 mm; P3, fibra y pulpa, 10 mm a 50 mm.      |
| F1 a F2. Fibra larga resina de PU. Espesor 1,5 cm a 2 cm. Composición: (80%,20%:fibra,PU) Tipos de adiciones: F1 fibra larga de 25 x 15 cm; P2, pulpa, 0,1mm a 50 mm; F2 – F3 fibra larga de 25 x 15 cm.              |
| YA1 a YA2. Dos probetas extraídas de la misma placa. Fibra y pulpa 0,5 mm a 20 mm. 50% en volumen de yeso y 50% en volumen de fibra sin tratar. Agua (30% peso sobre mezcla seca). Cola 5% en peso sobre mezcla seca. |
| YF1 – YF2. Yeso con fibra corta (0,2 mm a 25 mm), sin tratar solo lavada. Agua 40% sobre mezcla seca. Cola vegetal 5% sobre mezcla seca.  |
| YB1 a YB3. Yeso con fibra y pulpa (médula), 0,5 mm; 70% yeso, 30% fibra. Más resistente. Agua 50% sobre mezcla seca. Sin cola.  |
| YB <sup>2</sup> 1 a YB <sup>2</sup> 4. Yeso con fibra y pulpa (médula), 0,5 mm; 70% yeso, 30% fibra. Más resistente. Agua 50% sobre mezcla seca. Contiene cola 10% sobre mezcla seca                                  |
| CNA1. Ceniza, cemento, fibra: 20% fibra, 40% ceniza de bagazo, 10% cola. Agua 40% sobre mezcla seca.  |

Tabla 3 “Nombres y composición de las probetas descritas en esta comunicación”

Las medidas de hinchamiento (%) se presentan en la tabla 4. La normativa ecuatoriana utilizada para esta prueba, establece un máximo del 20% de hinchamiento para tableros, por lo que los paneles reforzados con bagazo se encuentran dentro del rango requerido por la norma NTE INEN 899, el valor máximo obtenido fue del 12.50% para la muestra B2, resultando adecuados para ser aplicados en construcción.

| Muestra | Espesor previo (cm) | Espesor 2 horas (cm) | Espesor 24 horas (cm) | Hinchamiento 2 horas (%) | Hinchamiento 24horas (%) |
|---------|---------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Y2      | 2,12                | 2,13                 | 2,19                  | 0,47                     | 3,30                     |
| Y4      | 3,15                | 3,16                 | 3,21                  | 0,32                     | 1,90                     |
| Y5      | 2,10                | 2,11                 | 2,17                  | 0,48                     | 3,33                     |
| CN1     | 2,12                | 2,13                 | 2,18                  | 0,47                     | 2,83                     |
| C1      | 1,52                | 1,53                 | 1,59                  | 0,66                     | 4,61                     |
| B2      | 1,52                | 1,54                 | 1,71                  | 1,32                     | 12,50                    |
| P2      | 1,51                | 1,54                 | 1,60                  | 1,99                     | 5,96                     |
| F1      | 2,14                | 2,18                 | 2,20                  | 1,87                     | 2,80                     |

Tabla 4 “Hinchamiento”



Fig. 6 “Ensayo del hinchamiento”

Durante los ensayos de resistencia al fuego, después de transcurrir 35 minutos y 63 minutos, respectivamente, se pudo observar una pequeña perforación de la cara principal y posterior de los tableros sometidos al fuego que habían sido fabricados con conglomerantes hidráulicos y yeso, respectivamente, a diferencia de los materiales de secado rápido (fibras con colas y resinas sintéticas) los que, al momento de aplicarles fuego desarrollaron llamas que progresaron con rapidez, con una duración de 10 minutos para que el fuego produzca daños. Sin embargo, tras retirar la aplicación del fuego del quemador, las cenizas producidas se apagaron automáticamente, presentando daños mínimos solamente en el lugar donde se colocó el fuego. Los tableros que llegaron a una resistencia mínima de aproximadamente 30 min, fueron los que contienen un mayor porcentaje de fibra adicionada al yeso y cemento, y cumplen con la normativa.

A continuación se muestran en la tabla 5 los resultados de las pruebas de fuego de cada elemento ensayado. La clase resistente y clasificación se la determinó por el tiempo de duración a la acción del fuego, en minutos.

| MUESTRA | Clasificación según la resistencia |                   |
|---------|------------------------------------|-------------------|
|         | Residencial F30                    | E. verticales F60 |
| Y2      | -                                  | F60               |
| Y4      | -                                  | F63               |
| Y5      | F31                                | -                 |
| CN1     | F48                                | -                 |
| C1      | -                                  | F60               |
| B2      | -                                  | F60               |
| F1      | -                                  | -                 |
| F2      | -                                  | -                 |

Tabla 5. Comportamiento al fuego



Fig. 7 “Ensayo al fuego”.

Los ensayos de perforación y resistencia al anclaje se evaluaron cualitativamente, no cuantitativamente. Se utilizaron los restos de probetas, paneles y tableros que habían sido ensayados a flexión, hídricos (después de secados) y fuego en las zonas menos afectadas. Se pudo comprobar y determinar que los paneles y tableros experimentados no sufrieron ninguna fisura al momento de penetrar el taladro y el tornillo autorroscante en su caso, por lo que son elementos de fácil anclaje, independientemente de la estructura en la que se vaya a utilizar [18].



Fig. 8 “Perforacion y anclaje de tableros”.

Concluida la primera fase de fabricación de probetas y realización de los ensayos mecánicos e hídricos, con las muestras extraídas de las placas de gran formato, se hicieron nuevas probetas de cemento y yeso con elevadas fracciones volumétricas de fibras cortas de bagazo y pulpa, y partículas de ceniza de bagazo de mayor tamaño.

Las dosificaciones de estas nuevas probetas se realizaron mediante criterios de facilidad de mezcla manual, ya que se trata de simular en laboratorio y caracterizar cuantitativamente, los procedimientos de mezcla artesanal accesibles a operarios cualificados pero con medios solo artesanales.

En todos los resultados obtenidos, bien fuera el módulo de elasticidad a flexión, comportamiento a compresión, el porcentaje de hinchazón, se encuentran dentro de la escala de valores especificados en cada una de las normativas. Sin embargo, se está analizando con mayor profundidad las alternativas de modificar los componentes de paneles y tableros con miras a mejorar su desempeño frente a ensayos de termitas, humedad, fuego, aislamiento térmico y acústico, evaluando diversos tratamientos preventivos de las fibras vegetales que se puedan realizar fácilmente en los ámbitos donde va dirigida la investigación: mejora de viviendas tradicionales. De acuerdo con los resultados obtenidos es posible definir, que dentro de las variables importantes que condicionan las características mecánicas y físicas de los elementos no estructurales que pueden ser producidos por los paneles propuestos que se han analizado, están:

- El espesor de los paneles y tableros
- Dimensiones y sección transversal en los elementos.
- Las características y propiedades de los materiales utilizados en la producción de los paneles y tableros.
- Tratamientos preventivos de las fibras vegetales.

## 6.- Conclusiones

Los ensayos mecánicos y físicos realizados a cada una de las probetas tomando como base las normativas correspondientes, indican efectivamente que los paneles y tableros compuestos fabricados a base de residuos de caña de azúcar con sus diferentes composiciones y los materiales analizados cumplen con las especificaciones requeridas para cada una de las denominaciones. De acuerdo con esto, es posible emplearlos para realizar sistemas constructivos civiles que puedan ser de carácter no estructural.

La adición de cenizas de bagazo mejora las prestaciones de los paneles y tableros.

Se obtienen mejores resistencias al fuego con paneles de cemento y de yeso con fibras de bagazo que con fibras y pulpa con resinas.

La hinchazón de los tableros es inferior al límite establecido en la normativa, cuando las matrices son de yeso y cemento.

Los paneles admiten elevadas fracciones de fibra (superiores al 100% del conglomerante) mediante procedimientos manuales tradicionales de fabricación.

Se recomienda hacer ensayos adicionales de mejora de los tratamientos preventivos de las fibras, para garantizar la durabilidad y hacer ensayos de aislamiento acústico y térmico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Ing. Ángel Tapia y a los estudiantes Gabriel Ochoa y Magaly Jiménez, grupo de gestores de investigación de la Universidad Técnica Particular de Loja, quienes han aportado con sus conocimientos y trabajo en el desarrollo del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC 2012. INEC. <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/>
- [2] Jianghua Li, Nikolas Provasas, Geoff Brooks. Kinetics of scrap melting in liquid steel. Metallurgical and Materials Transactions B. April 2005, Volume 36, Issue 2, pp 293-302
- [3] Cerqueira, D.A., Rodrigues, G., Meireles, C.D. Optimization of sugarcane bagasse cellulose acetylation. Carbohydr. Polym. 2007; 69, 579–582.
- [4] Moisés Frías, E. Villar-Cociña, E. Valencia-Morales. Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters Waste Management 2007; 27(4) 533–8.
- [5] Javad Torkaman, Alireza Ashori, Ali Sadr Momtazi. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. Construction and Building Materials 50 (2014) 432–436.
- [6] R.S. Olivito, O.A. Cevallos, A. Carrozzini. Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures. Materials and Design 57 (2014) 258–268.
- [7] F. Hernández-Olivares, Ignacio Oteiza, Luis de Villanueva. Experimental analysis of toughness and modulus of rupture increase of sisal short fiber reinforced hemihydrated gypsum. Composite Structures 22(1992) 123-137.
- [8] <http://www.americaeconomia.com/entidades/federacion-nacional-de-azucareros-del-ecuador-fenazucar>
- [9] [http://www.ecured.cu/index.php/Bagazo\\_de\\_ca%C3%B1a](http://www.ecured.cu/index.php/Bagazo_de_ca%C3%B1a)
- [10] S. R. Karade. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes (review paper). Construction and Building Materials 24 (2010) 1323–1330.
- [11] Miguel A. Pérez Méndez, Rufo Sánchez Hernández, David J. Palma López y Sergio Salgado García. Caracterización química del compostaje de residuos de caña de azúcar en el sureste de México. INTERCIENCIA. JAN 2011, VOL. 36 N° 1.
- [12] Aguilar-Rivera N. Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel Effect of Storing of Bagasse on Physical Properties from cellulose for Paper. IngenieríaInvestigación y Tecnología. Vol. XII, Núm. 2, 2011, 189-197, ISSN 1405-7743 FI-UNAM.
- [13] John A. Youngquist, Brent E. English, Roger C. Scharmer, Poo Chow, Steven R. Shook. Literature Review on Use of Nonwood Plant Fibers for Building Materials and Panels. United States Department of Agriculture. Forest service Forest Products Laboratory General Technical Report FPL-GTR-80. 1994.
- [14] Y.R. Loh, D. Sujana, M.E. Rahman, C.A. Das Sugarcane bagasse—The future composite material: A literature review. Resources, Conservation and Recycling 75 (2013) 14– 22
- [15] Forest Products Laboratory. 2010. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. April 2010.
- [16] J.M.L. Reis. Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete. Construction and Building Materials 20 (2006) 673–678.

[17] Morteza Khorami, Eshmaiel Ganjian. Comparing flexural behaviour of fibre–cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3661–3667.

[18] Ochoa, G. Jiménez, M. “Reutilización del bagazo de la caña de azúcar, en la elaboración de tableros y su aplicación en paredes, pisos y cielos falsos.” Trabajo de fin de titulación en Arquitectura. Escuela de Arquitectura. UTPL, 2014.