

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EPOXI REFORZADO CON FIBRA DE YUTE APLICADA A BALDOSAS CERÁMICAS PARA UN SISTEMA DE FACHADA VENTILADA

Aline Ribeiro ^(1,2), Hermes Mariot ⁽²⁾, Elídio Angioletto ⁽¹⁾, Angela Watemkemper Vieira ⁽²⁾, Adriano Michael Bernardin ⁽¹⁾, Agenor De Noni Jr. ⁽³⁾

¹ Programa de Grado en Ciencias e Ingeniería de los Materiales, PPGCEM, Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, Criciúma, 88806-000, Santa Catarina, Brasil

² Eliane Revestimentos Cerâmicos, Cocal do Sul, 88845-000, Santa Catarina, Brasil

³ Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 88040-900, Santa Catarina, Brasil

RESUMEN

La fachada ventilada es una de las soluciones halladas por la construcción civil y la arquitectura para aumentar la vida útil de los edificios. Entre los materiales utilizados como revestimiento, se encuentran las baldosas cerámicas. Las mallas de fibra de vidrio se adhieren al dorso de la cerámica mediante resina epoxi. La finalidad de utilizar este composite conjunto se debe a la seguridad. En la actualidad, varios estudios se centran en la sustitución de fibras sintéticas por fibras naturales. Entre las fibras naturales, el yute es la más barata y la más ampliamente producida. El presente trabajo compara las prestaciones mecánicas entre la fibra de vidrio y la fibra de yute. Se han confeccionado los siguientes composites conjuntos: baldosas de porcelana esmaltada, resina epoxi, malla de fibra de vidrio y malla de fibra de yute. La fibra de yute puede presentar una resistencia a la tracción un 88% inferior a la de la fibra de vidrio, a pesar de cumplir con la norma para el requisito mínimo del impacto de seguridad en el ensayo de cuerpo duro.

1. INTRODUCCIÓN

La fachada ventilada es una de las soluciones halladas por la construcción civil y la arquitectura para aumentar la vida útil de los edificios. Esto se debe a la eficiencia energética y a las características estéticas [1] que aporta. La fachada ventilada se compone básicamente de baldosas cerámicas y una subestructura auxiliar [2,3]. Este sistema mantiene las baldosas cerámicas alejadas de la subestructura. De esta manera, se forma una cámara de aire que refrigera el edificio.

Según Campos [3], las ventajas de la fachada ventilada respecto a la fachada adherida son: ahorro energético; reducción/eliminación de problemas de humedad, eflorescencias o infiltraciones de la envolvente del edificio; reducción del deterioro y de los costes de mantenimiento de la fachada; resultados satisfactorios en obras de renovación; mejora del confort térmico/acústico, y reducción/eliminación del riesgo de desprendimiento de las baldosas cerámicas.

Como componentes de revestimiento de la fachada ventilada, se pueden utilizar materiales cerámicos, metálicos o poliméricos. Cuando se utilizan baldosas cerámicas, el componente de la fachada consiste en una resina epoxi reforzada con una malla de fibra de vidrio adherida al dorso de la baldosa cerámica. Este composite conjunto se utiliza en fachadas ventiladas para garantizar la seguridad del consumidor en caso de rotura de la baldosa cerámica. Gracias a ello, la baldosa cerámica rota no se desprende de la fachada del edificio. Según Richardson et al. [4], la posibilidad de que posteriormente se produzcan desconchados es una preocupación importante a la hora de proteger al público de los restos que pueden producirse debido a la fragmentación.

Durante la última década, con el aumento de la preocupación medioambiental, ha habido un interés creciente por las fibras naturales. Los composites poliméricos de fibras naturales se han utilizado cada vez más en aplicaciones industriales como sustitutos de composites de fibras sintéticas. Los principales factores a favor son las ventajas medioambientales y económicas que ofrecen por la reducción de peso, su mayor resistencia específica, mayor módulo de elasticidad y precio reducido [5-20]. Según Bisaria et al. [21], la fibra de yute es una de las principales fuentes de fibras lignocelulósicas entre las fibras naturales. La fibra de yute se obtiene del tallo de la planta *Corchorus capsularis*, originaria de la región amazónica. Esta fibra se introdujo en Brasil en los años 1950-1980. La fibra de yute tiene una resistencia moderada a la tracción y a la flexión en comparación con otras fibras naturales. Los composites poliméricos reforzados con fibra de yute son adecuados para aplicaciones estructurales primarias, elementos interiores y aplicaciones temporales en exteriores. La característica aislante del yute resulta útil en las puertas y techos de automóviles y los paneles de separación entre el motor y el habitáculo [21]. Tradicionalmente se utiliza en la fabricación de bolsas, cortinas, hilos, textiles y cuerdas, entre otros [22].

En los últimos años, se construyen fachadas ventiladas con piezas cerámicas de gran formato y reducido espesor. Entre las propiedades de los materiales cerámicos, la resistencia al impacto es una de las características más críticas a tener en cuenta para garantizar su idoneidad en este tipo de aplicaciones [23,24]. Por ello, en este trabajo se estudia la sustitución de la fibra de vidrio por fibra de yute natural como refuerzo del revestimiento cerámico utilizado en las fachadas. Se ha determinado el comportamiento mecánico del composite estructural y se ha estudiado el comportamiento mecánico de cada componente individual, además del composite conjunto, frente al impacto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

a) Materiales

Los materiales utilizados en la preparación de los sistemas finales incluían baldosas de porcelana esmaltada, resina epoxi, malla de fibra de vidrio y malla de fibra de yute. La malla de fibra de yute se preparó para que fuera compatible con la resina epoxi.

Las baldosas de porcelana esmaltada de $59 \times 118,2 \times 1,2$ cm (anchura, longitud y grosor) fueron suministradas por Mohawk Brasil. La resina epoxi de dos componentes, un derivado de bisfenol A y aminas (DGEBA), fue suministrada por Shackerley (Reino Unido). La fibra de vidrio era una malla bidireccional de clase E, proporcionada por Gavazzi (Italia). El alambre de la malla de fibra de vidrio tenía unas dimensiones de $4,0 \times 4,5 \times 3,0$ mm. La malla de fibra natural era similar a la de fibra de vidrio (dimensiones), pero el grosor era de 8,0 mm. La malla de yute fue suministrada por la Companhia Têxtil Castanhal (Pará, Brasil). Se utilizó un plastificante a base de ésteres de ácido acrílico y estireno, suministrado por Claritex (Brasil), para que la malla de fibra de yute fuera compatible con la matriz polimérica. Con el tratamiento, la fibra de yute aumentó un 66% más de peso que la fibra de vidrio. El plastificante tenía un contenido de sólidos del 50% y una viscosidad de $3,0\text{-}5,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. La Fig.01 muestra las fibras utilizadas en este trabajo.

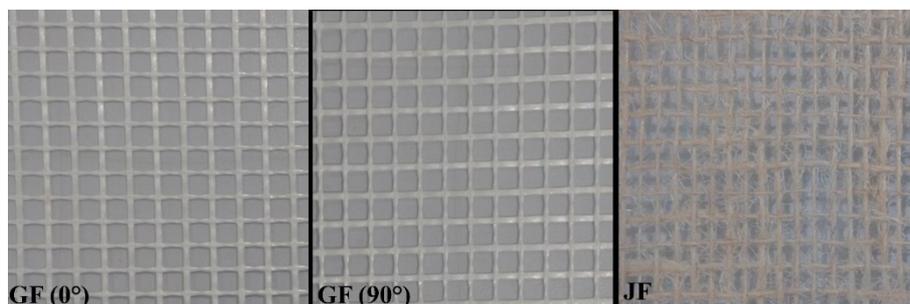


Figura 01. Mallas de fibra de vidrio a 0° (GF (0°)) y 90° (GF (90°)) y malla de fibra de yute (JF)

b) Preparación de las probetas:

Para realizar los ensayos mecánicos, se prepararon tres configuraciones: (1) baldosa cerámica + resina epoxi (Cer + E); (2) baldosa cerámica + resina epoxi + fibra de vidrio (Cer + GFRE) además de baldosa cerámica + resina epoxi + fibra de yute (Cer + JFRE); y (3) resina epoxi + fibras (GFRE y JFRE).

Para la primera y segunda configuración, el procedimiento fue la siguiente: las baldosas de porcelana esmaltada se cortaron para hacer muestras de 30×30 cm utilizando una máquina de corte industrial. Las mallas (fibra de vidrio y yute) se cortaron de acuerdo con el tamaño de las baldosas cerámicas usando un estilete. El plastificante se aplicó a la malla de fibra de yute natural con un pincel en una capa de $0,280 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. La pantalla se dejó secar a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 h. Para ambas fibras (GF y JF), la resina epoxi se aplicó utilizando un pincel y una espátula metálica. La mezcla de la resina (82% en peso) con el endurecedor (18% en peso) se realizó siguiendo las instrucciones del proveedor. La resina epoxi se aplicó sobre ambas mallas con una capa de aproximadamente $0,50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Los composites se prepararon fijando las mallas de resina epoxi/fibra de vidrio o yute en la parte posterior de las baldosas.

El curado se realizó en un ambiente ventilado a $25\pm 1^\circ\text{C}$ durante 72 h. Tras el curado, las muestras fueron cortadas a las dimensiones requeridas para cada ensayo siguiendo la norma correspondiente. Tras el corte, las probetas se secaron a 40°C hasta peso constante.

Para la tercera configuración, se utilizó el método "*hand lay-up*" (método de conformación en molde abierto) para obtener láminas con capas de 4 kg/m^2 y con el espesor requerido para los ensayos. Una vez preparadas las planchas, se cortaron en las dimensiones requeridas.

3. MÉTODOS DE ENSAYO

Las microestructuras de los composites se evaluaron con un microscopio electrónico de barrido (SEM) (Zeiss EVO-MA10).

Se utilizó una máquina universal de ensayos (EMIC DL10000, célula de carga de 1.000 kgf) para determinar el comportamiento mecánico de las muestras. La resistencia a la tracción de las fibras se determinó para hilos en probetas de $25\times 25\text{ cm}$ (diámetro \times longitud) en dirección axial. Se utilizaron 6 hilos en cada fibra y se aplicó resina epoxi en el extremo de cada muestra para fijar las muestras en las abrazaderas. Se ensayaron cinco muestras de cada fibra a 2 mm/m. Para comprobar la resistencia a la tracción de las muestras de resina + fibra (GFRE y JFRE), las dimensiones de las probetas se basaron en el método de ensayo normalizado para composites de matriz polimérica con dimensiones de $2,5\times 25\times 0,25\text{ cm}$. Se ensayaron cinco muestras de cada sistema de resina + fibra a 2 mm/m. Para el ensayo de resistencia a la tracción de los composites conjuntos, se utilizaron muestras de $1,2\times 25\times 1,2\text{ cm}$. El ensayo de resistencia a la flexión se basó en la norma ISO 10545-4:2014, utilizando muestras de $25\times 2,5\text{ cm}$. Se ensayaron cinco muestras de cada configuración a una velocidad de 1 mm/min.

El ensayo de impacto Charpy se realizó con un martillo de 75 J. La altura del martillo se modificó para una energía de impacto de 1 J. Debido al grosor de las muestras (1,2 cm) y para evitar que el martillo se quedara pegada en la muestra, se modificó la altura del martillo (a 55 cm). Se realizó una muesca de 1,0 cm en la baldosa cerámica (utilizando un disco de corte) para minimizar el efecto de la baldosa y evaluar solamente la energía absorbida por el composite. El espesor total de la muestra fue de 12 cm.

Las configuraciones (Cer + GFRE y Cer + JFRE) se sometieron al ensayo de impacto de cuerpo duro. El procedimiento se basó en la norma brasileña NBR 15.575-4:2013 (*Requisitos para sistemas de envolventes verticales internas y externas*, SVVIE). No se analizaron los desplazamientos y movimientos de la subestructura. Se evaluaron los fallos, fisuras, hundimientos, transposición, desprendimiento y colapso del sistema. Los fallos fueron más graves en el sistema de fachada ventilada que en el sistema tradicional. Por lo tanto, el desempeño mínimo de seguridad o la transposición de la esfera no fueron considerados como colapso del sistema. La norma NBR 15.575-4:2013 establece que la baldosa cerámica no debe romperse después de 10 impactos sobre la muestra utilizando dos esferas (0,5 y 1,0 kg). Las baldosas cerámicas se fijan verticalmente, como en la fachada de un edificio, y las esferas golpean la superficie de las muestras con un movimiento pendular. Se analizaron las energías de impacto para fachadas en condiciones reales de uso (3,75 J) y por la seguridad (20 J). La dimensión de las muestras era de $59\times 118,2\text{ cm}$, correspondiente al tamaño industrial de las baldosas cerámicas utilizadas en las fachadas ventiladas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Análisis microestructural

La Fig.02 muestra la microestructura de los composites conjuntos GF y JF. En la Fig.2(A), se observa una delgada capa de epoxi (400 μm) sobre la malla de fibra de vidrio. La sección longitudinal de la fibra de vidrio muestra la homogeneidad de los hilos (Fig.(B)). En la Fig.2(C), se observa la capa de epoxi sobre el composite conjunto de fibra de yute (1.000 μm). La resina epoxi cubre las fibras, pero no rellena completamente la trama. Como las fibras de yute son gruesas, el grosor del composite conjunto fue consecuentemente mayor. Se formó un vacío en la pieza debido a la irregularidad de la fibra natural (Fig.2(C)). La sección longitudinal de la fibra de yute se ve en la Fig.2(D). Aunque la fibra de yute es natural, los hilos muestran diámetros homogéneos. Sin embargo, las fibras más largas muestran espesores diferentes, ya que el hilo de yute no es continuo (como la fibra de vidrio).

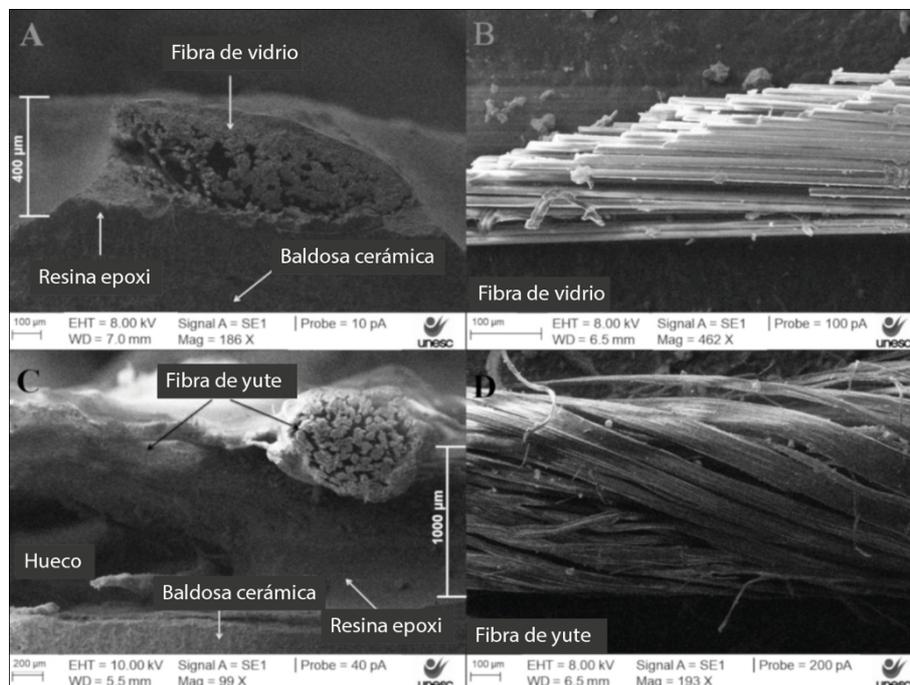


Figura 02. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de los composites conjuntos de fibra de vidrio y fibra de yute: (A) sección transversal del composite de fibra de vidrio, (B) sección longitudinal de la fibra de vidrio, (C) sección transversal del composite de fibra de yute, y (D) sección longitudinal de la fibra de yute.

b) Fibra: Resistencia a la tracción

La Fig.03. muestra la resistencia a la tracción y la carga de rotura de las mallas de fibra de vidrio y fibra de yute. En la dirección 0° , la resistencia a la tracción de la malla de fibra de vidrio es mayor, debido al entrelazamiento de las fibras de urdimbre (dirección 0°) con las de trama (dirección 90° , véase la Fig. 01). La resistencia a la tracción de la malla de fibra de yute fue un 88% inferior a la de la malla de fibra de vidrio a 0° . La carga de rotura de la malla de fibra de yute fue un 75% inferior a la de la malla de fibra de vidrio en la dirección de 90° .

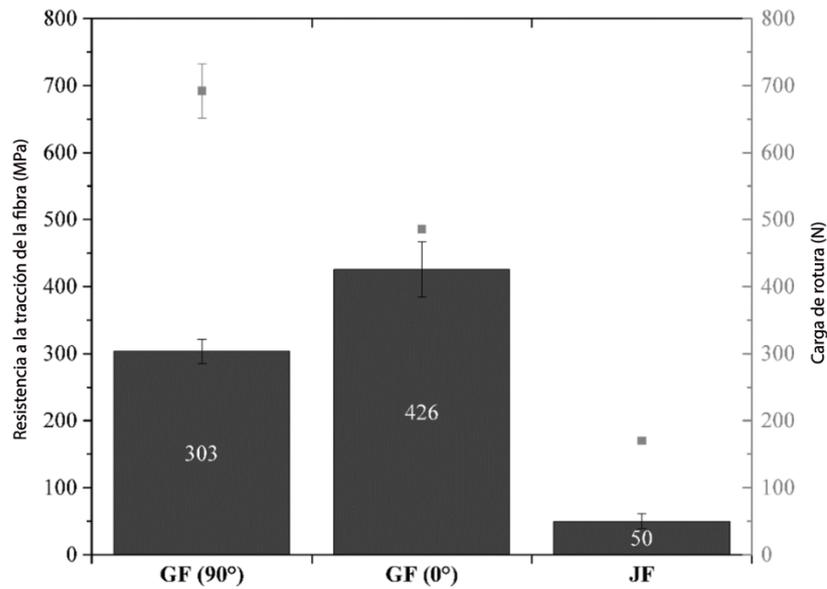


Figura 03. Resistencia a la tracción (columnas) y carga de rotura (puntos) de las fibras GF (0°), GF (90°) y JF

Aunque la malla de fibra de yute mostró una carga de rotura menor que la de la fibra de vidrio, no se esperaba una menor resistencia a la tracción. La Fig. 04 muestra la carga de rotura × desplazamiento de las mallas de fibra. El fallo de la malla de fibra de vidrio es abrupto, mientras que el de la malla de fibra de yute es continuo. El fallo de la malla de yute se produce después de un gran desplazamiento en comparación con la de la fibra de vidrio, una característica positiva para los composites. Bensadoun et al. [25] y Ramesh et al. [22] afirmaron que los defectos causados por el crecimiento y procesamiento de las fibras naturales son heterogéneos a lo largo de su longitud, lo que debilita su resistencia, explicando así este comportamiento.

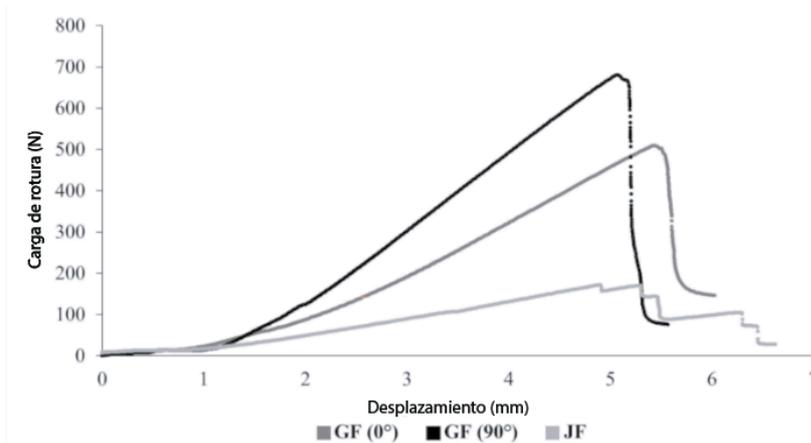


Figura 04. Carga de rotura × desplazamiento de las mallas de fibra GF (0°), GF (90°) y JF

c) Composite y composites conjuntos: Resistencia a la tracción y a la flexión

La resistencia a la tracción de la resina epoxi aumentó con el refuerzo de las mallas de fibra (Fig.05), con un aumento del 77% para la fibra de vidrio a 90°. El epoxi reforzado con fibra de yute tuvo un aumento del 35% de resistencia a la tracción. Para todas las muestras, la transferencia de carga desde la matriz a la fibra se debió a una buena interfaz fibra-matriz.

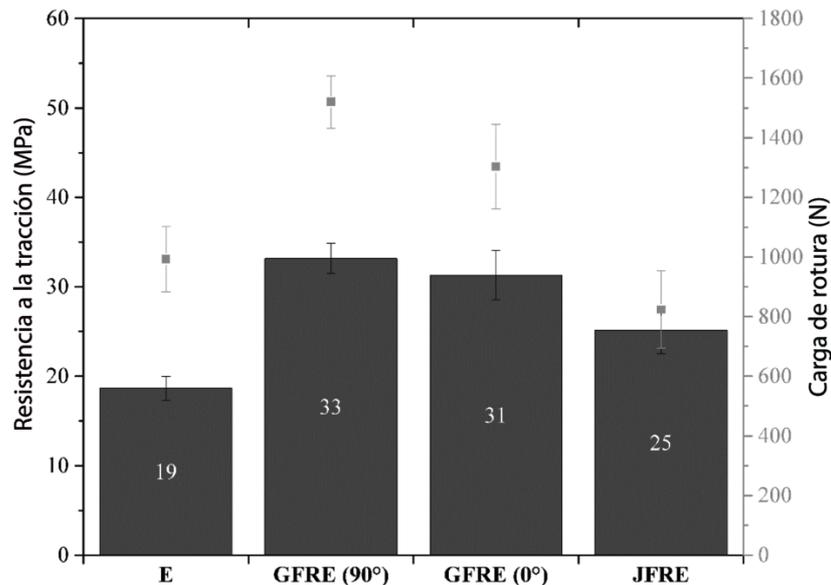


Figura 05. Resistencia a la tracción del epoxi y de los composites GFRE (0°), GFR90°) y JFRE

En cuanto a la carga de rotura de los composites, la mayor carga correspondió a la malla de fibra de vidrio de 90°, lo que concuerda con su mayor resistencia a la tracción. La carga más baja correspondió al epoxi reforzado con fibra de yute (JFRE). Como el grosor de la fibra de yute es dos veces mayor que el de la fibra de vidrio, se redujo el grosor de la capa de epoxi en las muestras, lo que dio lugar a una carga de rotura más baja.

No incrementó la resistencia a la tracción y a la flexión de los composites conjuntos. Además, no hubo aumento de la resistencia a la tracción/flexión ni de la carga de rotura, ni siquiera en el caso del composite reforzado con fibra de vidrio. Aunque la norma UNI 11018:2003 establece la evaluación de la resistencia a la flexión de la baldosa cerámica, la norma no considera el efecto del refuerzo de fibra. El efecto de la fibra no se tuvo en cuenta, debido al espesor de la baldosa cerámica (12 mm), mucho mayor que el de la fibra de vidrio (0,30 mm), la fibra de yute (0,8 mm) y la capa de epoxi (~0,4 mm). Sin embargo, cuando se utilizan piezas de porcelana de bajo espesor (3 mm), debe tenerse en cuenta el efecto de la fibra.

d) Resistencia al impacto de los composites

La Fig.06. muestra la energía absorbida de los composites medida usando el ensayo de impacto Charpy. La baldosa cerámica y la resina epoxi absorbieron una pequeña cantidad de energía durante el ensayo de impacto, debido a la naturaleza frágil de estos materiales. El epoxi reforzado con fibra de vidrio (GFRE 90°) mostró la mayor absorción de energía, seguido del GFRE 0° y del JFRE. La variabilidad en los resultados de las muestras de fibra de vidrio se debe a la deslaminación durante el ensayo de impacto. La energía absorbida es mayor cuando hay deslaminación. Cuando las fibras se rompen, la absorción de energía es menor.

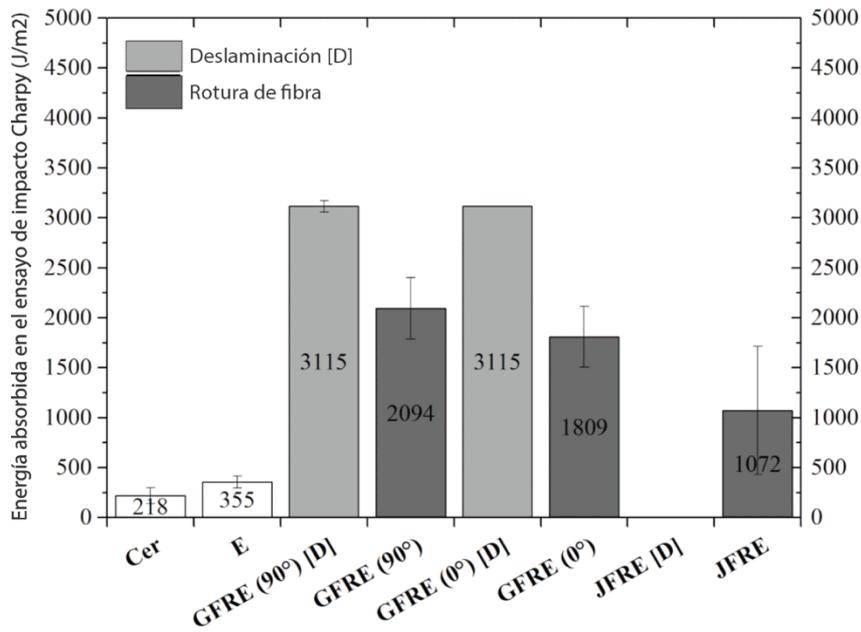


Figura 06. Ensayo de impacto Charpy sobre la baldosa cerámica (Cer), resina epoxi (E), y composites GFRE (0°), GFRE (90°) y JFRE (con muesca)

Bensadoun et al. [25] afirmaron que los composites con matriz epoxi tienden a fallar al someterse a impactos debido a la extensa deslaminación causada por su baja resistencia al crecimiento de fisuras entre láminas. La propagación de la fisura se observó en el ensayo de resistencia al impacto (Fig.07). Las muestras de fibra de yute no se deslaminaron, pero las fibras se rompieron. La variabilidad en los resultados es inherente a la característica natural de la fibra. La fractura del composite conjunto en el ensayo Charpy muestra el modo interlaminar tipo II (Fig.07).

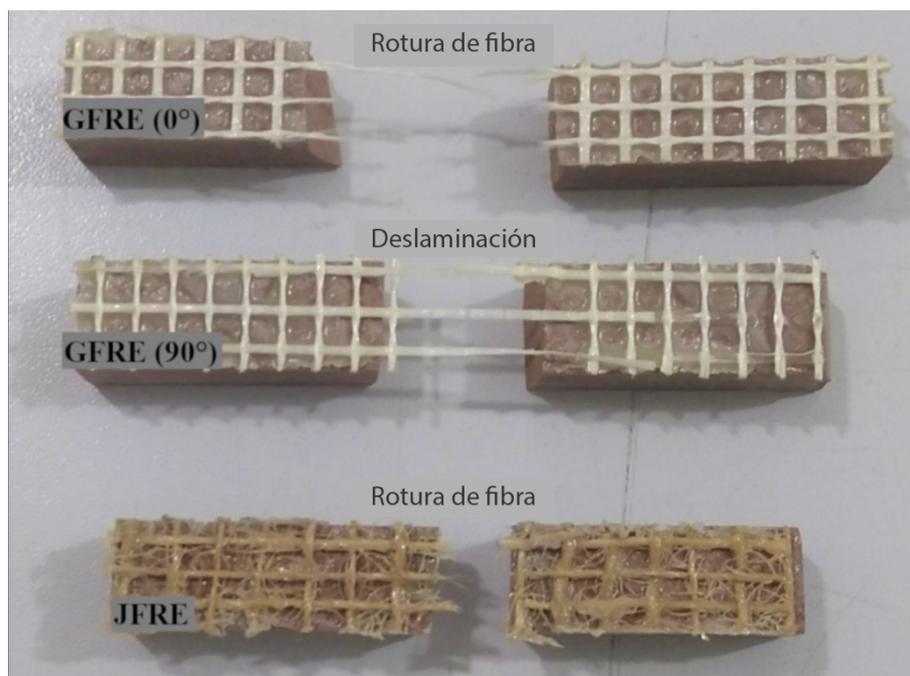


Figure 07. Ensayo de impacto Charpy: modo de fractura de los composites GFRE (0°), GFRE (90°) y JFRE (con muesca)

La energía absorbida aumenta (Fig.06) cuando aumenta la carga de rotura de las mallas de fibra (Fig.03). Sin embargo, la carga de rotura de la malla de fibra de yute es demasiado pequeña para justificar la energía absorbida en el ensayo Charpy. Por otra parte, además de la carga de rotura superior a la de la malla de fibra de yute, la resina epoxi muestra poca energía absorbida bajo impacto. Las muestras de epoxi reforzado con fibras presentan el efecto combinado de ambos componentes, la resina y las fibras. La matriz de epoxi aumenta la carga de rotura del composite, y las fibras aumentan la energía absorbida en el impacto.

e) Resistencia a impacto de cuerpo duro

El ensayo de impacto de cuerpo duro se asemeja al comportamiento en condiciones reales. Para un impacto de 3,75 J (impacto durante el uso), se observó un fallo del sistema (grietas, fisuras o hundimientos) en todas las condiciones, incluida la baldosa cerámica sola. Por lo tanto, todas las configuraciones cumplen los requisitos de la norma.

La Fig.08. muestra los resultados del ensayo de impacto de 20 J después de 10 impactos. La baldosa cerámica sola (Cer) y la baldosa cerámica con resina epoxi (Cer+E) fueron transpuestas (perforadas) por la esfera. Este resultado no es aceptable según los requisitos de seguridad de la norma. Cuando se utilizaron las mallas de fibra, los sistemas mostraron grietas, fisuras y hundimientos, pero sin transposición de la esfera y por lo tanto los sistemas no colapsaron. Por tanto, ambos sistemas, los composites Cer+GFRE y CER+JRFE, son adecuados para su uso en fachadas, mostrando el nivel mínimo de seguridad contra los impactos. El comportamiento más frecuente en ambos casos fue el hundimiento sin transposición.

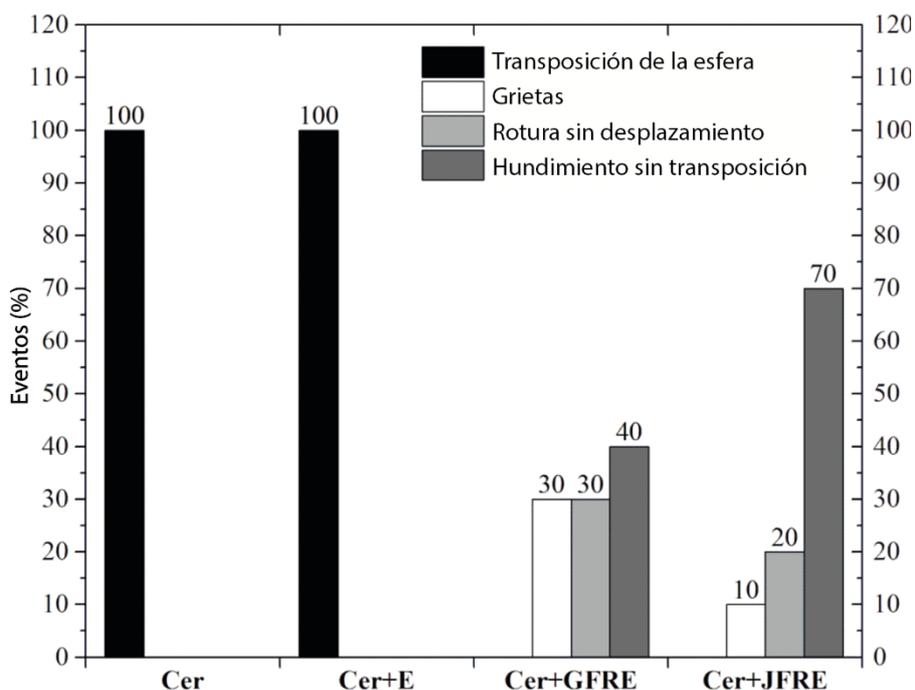


Figura 08. Porcentaje de eventos con el impacto de cuerpo duro de 20 J para la baldosa cerámica (Cer), resina epoxi (E) y composites Cer+GFRE y CER+JRFE

Además de los resultados similares de la malla de yute y la malla de fibra de vidrio en cuanto a la aparición de hundimientos sin transposición, los mecanismos de absorción de energía tras el impacto fueron diferentes en las dos mallas de fibra. Algunas fibras de yute se rompieron en la región de los hundimientos (Fig.09).

También se observó la rotura de fibras en el ensayo de resistencia a la tracción (Fig.04). A pesar de la menor resistencia a la tracción de la malla de fibra de yute, una elongación antes de la rotura similar a la de la malla de fibra de vidrio podría explicar el comportamiento de la fibra natural. Las regiones de hundimiento de ambos sistemas se ven en la Fig.09. Algunas fibras de yute se rompieron, mientras que las de fibra de vidrio no, probablemente debido a su mayor resistencia a la tracción.

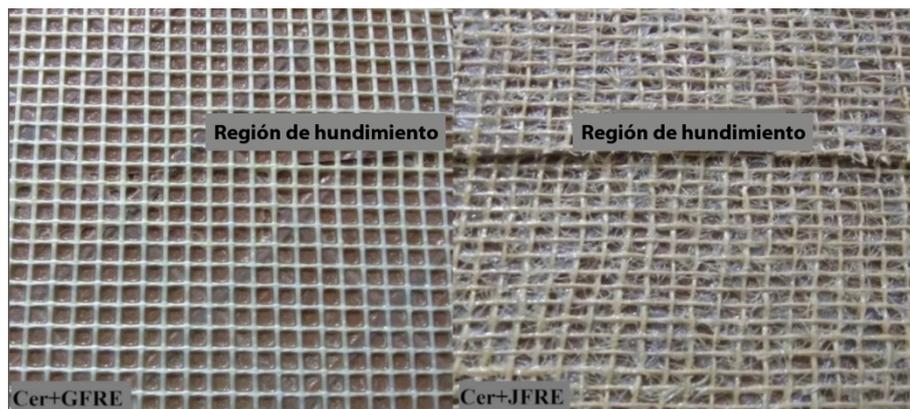


Figura 09. Región de hundimiento tras el ensayo de impacto con cuerpo duro de 20 J: fibra de vidrio x fibras de yute

Comparando el ensayo Charpy con el de impacto de cuerpo duro, las probetas no reforzadas mostraron una absorción de energía muy baja (en el ensayo Charpy), inferior a 360 J/m^2 , mientras que todas las reforzadas alcanzaron al menos 1100 J/m^2 . Ambos sistemas reforzados con fibra - de vidrio o de yute - cumplían los requisitos de seguridad de la norma. La menor energía absorbida y carga de rotura de la malla de fibra de yute también podría explicar la mayor incidencia de hundimiento sin transposición.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se comparó el comportamiento mecánico de un composite reforzado con fibra de yute con el de un composite reforzado con fibra de vidrio para fachadas ventiladas. Aunque la malla de fibra de yute muestra un 88% menos de resistencia a la tracción que la malla de fibra de vidrio, la fibra de yute se rompe gradualmente, sin mostrar un comportamiento frágil, una característica importante para los composites.

A pesar de la menor resistencia a la tracción y energía absorbida (ensayo de impacto Charpy), el composite de fibra de yute muestra un comportamiento mecánico adecuado. De acuerdo con el ensayo de impacto de cuerpo duro, ambos composites conjuntos presentan un desempeño adecuado para la seguridad en condiciones de uso real. El composite conjunto de fibra de yute (Cer+JFRE) mostró un mayor hundimiento que el de la fibra de vidrio sin transposición de esfera, probablemente debido a la rotura parcial de las fibras que resulta inherente al origen y al procesado de las mismas.

Aunque las fibras de yute presentan prestaciones mecánicas inferiores a las de la malla de fibra de vidrio, el epoxi reforzado con yute cumple el requisito mínimo de la norma para fachadas ventiladas en cuanto a prestaciones mecánicas. Los requisitos de durabilidad y exposición al fuego deben tenerse en cuenta para poder garantizar una sustitución definitiva de la fibra de vidrio por fibras naturales.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ruá M J, Vives L, Civera V, López-Mesa B, 2010. Aproximación al cálculo de la eficiencia energética de fachadas ventiladas y su impacto ambiental. Castellón: Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico, Qualicer 1–15.
- [2] Müller A, Alarcon O E, 2005. Desenvolvimento de um sistema de fachada ventilada com placas cerâmicas de grês porcelanato voltado para a construção civil do Brasil. *Cerâmica* 51, 354–60.
- [3] Campos K F, 2011. Desenvolvimento de sistema de fixação de fachada ventilada com porcelanato de fina espessura. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- [4] Richardson A, Coventry K, Lamb T, Mackenzie D. 2016. The addition of synthetic fibers to concrete to improve impact/ballistic toughness. *Construction and Building Materials* 121, 612–21.
- [5] Dhakal H N, Zhang Z Y, Bennett N, Reis P N B, 2012. Low-velocity impact response of non-woven hemp fiber reinforced unsaturated polyester composites: Influence of impactor geometry and impact velocity. *Composite Structures* 94, 2756–63.
- [6] Ramesh M, Palanikumar K, Reddy K H, 2013. Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites. *Composites Part B: Engineering* 48, 1–9.
- [7] Meredith J, Ebsworth R, Coles S R, Wood B M, Kirwan K, 2012. Natural fiber composite energy absorption structures. *Composites Science and Technology* 72, 211–7.
- [8] Caprino G, Carrino L, Durante M, Langella A, Lopresto V, 2015. Low impact behaviour of hemp fiber reinforced epoxy composites. *Composite Structures* 133, 892–901.
- [9] Szolnoki B, Bocz K, Sóti P L, Bodzay B, Zimonyi E, Toldy A, et al, 2015. Development of natural fiber reinforced flame retarded epoxy resin composites. *Polymer Degradation and Stability* 119, 68–76.
- [10] Vimal R, Subramanian K H H, Aswin C, Logeswaran V, Ramesh M, 2015. Comparisonal study of succinylation and phthalicylation of jute fibers: Study of mechanical properties of modified fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today* 2, 2918–27.
- [11] Jabbar A, Militký J, Madhukar Kale B, Rwwiire S, Nawab Y, Baheti V, 2016. Modeling and analysis of the creep behavior of jute/green epoxy composites incorporated with chemically treated pulverized nano/micro jute fibers. *Industrial Crops and Products* 84, 230–40.
- [12] Meola C, Boccardi S, Boffa N D, Ricci F, Simeoli G, Russo P, et al, 2016. New perspectives on impact damaging of thermoset- and thermoplastic-matrix composites from thermographic images. *Composite Structures* 152, 746–54.
- [13] Abdellaoui H, Bensalah H, Raji M, Rodrigue D, Bouhfid R, Qaiss A, 2017. Laminated epoxy biocomposites based on clay and jute fibers. *Journal of Bionic Engineering* 14, 379–89.
- [14] Arpitha G R, Yogesha B, 2017. An overview on mechanical property evaluation of natural fiber reinforced polymers. *Materials Today* 4, 2755–60.
- [15] Deb A, Das S, Mache A, Laishram R, 2017. A study on the mechanical behaviors of jute-polyester composites. *Procedia Engineering* 173, 631–8.
- [16] Fiore V, Scalici T, Sarasini F, Tirilló J, Calabrese L, 2017. Salt-fog spray aging of jute-basalt reinforced hybrid structures: Flexural and low velocity impact response. *Composites Part B* 116, 99–112.
- [17] Jabbar A, Militký J, Wiener J, Kale B M, Ali U, Rwwiire S, 2017. Nanocellulose coated woven jute/green epoxy composites: Characterization of mechanical and dynamic mechanical behavior. *Composite Structures* 161, 340–9.
- [18] Khan Z, Yousif B F, Islam M, 2017. Fracture behaviour of bamboo fiber reinforced epoxy composites. *Composites Part B* 116, 186–99.
- [19] Väisänen T, Das O, Tomppo L, 2017. A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. *Journal of Cleaner Production* 149, 582–96.
- [20] Yu T, Tuerhongjiang T, Sheng C, Li Y, 2017. Phosphorus-containing diacid and its application in jute/poly(lactic acid) composites: Mechanical, thermal and flammability properties. *Composites Part A* 97, 60–6.
- [21] Bisaria H, Gupta M K, Shandilya P, Srivastava R K, 2015. Effect of fiber length on mechanical properties of randomly oriented short jute fiber reinforced epoxy composite. *Materials Today* 2, 1193–9.
- [22] Ramesh M, Palanikumar K, Reddy K H, 2017. Plant fiber based bio-composites: Sustainable and renewable green materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, 558–84.
- [23] Silva G, Muñoz A, Felú C, Cantavella V, 2002. Comportamiento mecánico frente al impacto de baldosas cerámicas. Castellón: Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico, Qualicer 385–99.
- [24] Dondi M, Guarini G, Melandri C, Raimondo M, Zanelli C, 2016. Resistance to impact of porcelain stoneware tiles. *Ceramics International* 42, 5731–6.
- [25] Bensadoun F, Depuydt D, Baets J, Verpoest I, van Vuure A W, 2017. Low velocity impact properties of flax composites. *Composite Structures* 176, 933–44.