

COMPORTAMIENTO DE DEGRADACIÓN DE FIBRAS VEGETALES INCORPORADAS EN MATERIALES CEMENTOSOS

Data de aceite: 02/06/2023

Laryssa Oliveira Bento

Universidad Estatal de Maranhão
Bacabal – Maranhão
<http://lattes.cnpq.br/5660871261959403>

Thamila Barroso

Universidad Estatal de Maranhão
Bacabal – Maranhão
<http://lattes.cnpq.br/5051879178810600>

Amanda Fernandes Pereira da Silva

Ingeniero Civil
Teresina – Piauí
<http://lattes.cnpq.br/6687283757018503>

Alisson Rodrigues de Oliveira Dias

Universidad Estatal de Piauí
Teresina – Piauí
<http://lattes.cnpq.br/7625882727010720>

RESUMEN: El uso de fibras vegetales en composites cementicios ha sido objeto de muchas investigaciones, ya que es una alternativa que tiene ventajas ambientales, sociales y económicas. Esta aplicación busca mejorar las propiedades mecánicas, especialmente de la resistencia a la tracción. Sin embargo, su incorporación tiene algunas restricciones, ya que este material puede sufrir degradación química al exponerse

al ambiente predominantemente alcalino de las matrices de cemento Portland, provocando la aparición de grietas y desprendimientos de la masa de hormigón, ya que la degradación que sufre la fibra es expansiva y genera microtensiones dentro de la matriz. Por lo tanto, el presente trabajo busca presentar una discusión teórica sobre este fenómeno, sus manifestaciones patológicas y los mecanismos utilizados para evitarlo. Como resultado, fue posible caracterizar el escenario de manifestaciones patológicas debidas a la incorporación de fibras vegetales en compuestos cementosos y compilar algunas técnicas aplicables para evitar su degradación y, en consecuencia, el deterioro de la matriz.

PALABRAS CLAVE: Composites cementicios. Tratamiento de fibras. Materiales alternativos. Cemento Portland. Patologías.

INTRODUCCIÓN

La evolución de la actividad de la construcción es esencial para el progreso social y económico. Por otro lado, es responsable de mayores impactos ambientales, como el alto consumo de

recursos naturales para la producción de insumos de construcción y la producción de residuos. Ante este escenario, el sector de la construcción busca materiales alternativos para su uso en la construcción que cumplan con los parámetros técnicos de los materiales y promuevan la reducción de estos impactos.

El desarrollo sostenible en este entorno requiere la evaluación del rendimiento de los materiales con el fin de comprender el comportamiento a largo plazo de estas nuevas prácticas para realizar el uso de materiales sostenibles. El uso de fibras vegetales para reforzar compuestos cementosos ha sido actualmente objeto de muchas investigaciones con el fin de determinar las propiedades físicas y químicas de las fibras cuando están presentes en el medio alcalino de las matrices de cemento Portland. El uso de fibras vegetales en Brasil demostró ser una alternativa viable a través de la gran diversidad de plantas fibrosas en la fauna brasileña, es decir, un material en gran cantidad y renovable concibiendo la reforestación de las mismas.

Estudios preliminares han demostrado el uso de fibras vegetales aceptables en términos de esfuerzos con mayores propiedades mecánicas, con respecto a los esfuerzos de tracción, tanto en morteros como en concreto. Por otro lado, la compatibilidad química se vio afectada, ya que las fibras tienen un alto grado de degradación cuando están presentes en el medio alcalino de las matrices cementicias, lo que puede provocar la aparición de manifestaciones patológicas en hormigones y morteros, como grietas, debido al efecto expansivo que sufre la fibra vegetal al degradarse. Si este proceso de degradación es continuo, pueden seguir produciéndose grietas, haciendo que la masa de hormigón se descargue, dejando el refuerzo expuesto a la acción de agentes agresivos presentes en el aire atmosférico.

Por lo tanto, este trabajo tuvo como objetivo identificar los principales tipos de fibras vegetales aplicadas en la incorporación en hormigones y las principales manifestaciones patológicas ocurridas como resultado del fenómeno de degradación de la fibra, además de presentar algunos procesos utilizados para evitar este desgaste químico, identificando la eficiencia y aplicabilidad de los mismos. La base se basó en el análisis crítico de investigaciones relevantes, a través de la búsqueda de artículos publicados en las principales bases de datos (Scopus, ScienceDirect y Web of Science) y por palabras clave (fibras vegetales, hormigón, degradación, expansión, agrietamiento, manifestaciones patológicas, compuestos de matrices cementicias).

USO DE FIBRAS VEGETALES EN COMPOSITOS CEMENTICIOS

El desarrollo de materiales compuestos reforzados por fibras de origen natural está motivado en gran medida por una mayor conciencia ambiental, debido a los problemas de eliminación de residuos y el agotamiento de los recursos petroquímicos. El uso de materiales naturales junto con técnicas de construcción modernas puede reducir los

residuos de construcción, aumentar la eficiencia energética y, al mismo tiempo, promover el concepto de sostenibilidad (DITTENBER y GANGARAO, 2012).

El uso de fibras vegetales en compuestos cementosos tiene algunas ventajas y desventajas. Entre las numerosas ventajas de esta técnica se puede destacar la gran diversidad de plantas fibrosas presentes en la fauna brasileña, bajo costo y costosa viabilidad para los pequeños productores. Los principales componentes de las fibras lignocelulósicas son: celulosa (40 a 50%), hemicelulosa (20 a 30%) y lignina (20 a 28%). Además de estos componentes se encuentran compuestos inorgánicos y solventes orgánicos, como pectinas, carbohidratos simples, gomas, saponinas, resinas, grasas, entre otros (OLIVEIRA, 2017).

Las matrices a base de cemento son frágiles y quebradizas y, bajo la acción de pequeñas fuerzas de tracción o deformaciones por elongación, tienden a la formación de grietas. El papel de las fibras, distribuidas de forma discontinua y aleatoria, es transponer las grietas, que surgen en el hormigón, ya sean causadas por las acciones de cargas externas o cambios de temperatura y humedad, como se puede ver en la Imagen 1. Las fibras causan una cierta ductilidad después del agrietamiento. Si las fibras son lo suficientemente resistentes, tienen la capacidad de adherirse a la matriz cementicia y, en cantidad suficiente, ayudarán a reducir la apertura de las grietas (LEMOS, 2019).

Sin embargo, como desventaja, los composites reforzados con fibras vegetales presentan pérdida de resistencia a medio y largo plazo debido al daño causado a las fibras, es decir, cambios en la estructura, composición y propiedades mecánicas, resultado de las reacciones químicas que se producen en la matriz. Por un lado, la porosidad de la matriz permite grandes variaciones en el contenido de humedad de las fibras y esto puede dar lugar a cambios morfológicos que causan pérdida de adhesión fibra-matriz. Por otro lado, la alta alcalinidad del cemento puede dañar las fibras y disminuir su capacidad de fortalecimiento (ARDANUY *et al.*, 2011).

Ambos fenómenos provocarán la aparición de grietas internas en la matriz de hormigón (Imagen 2), que debilitan la estructura del material, al tiempo que permiten la penetración de agentes agresivos a su interior, como cloruros y dióxido de carbono presentes en el aire atmosférico. Estos agentes pueden causar un grave deterioro al hormigón armado, al permitir el desarrollo de corrosión del refuerzo y, en consecuencia, reducir la durabilidad del material.

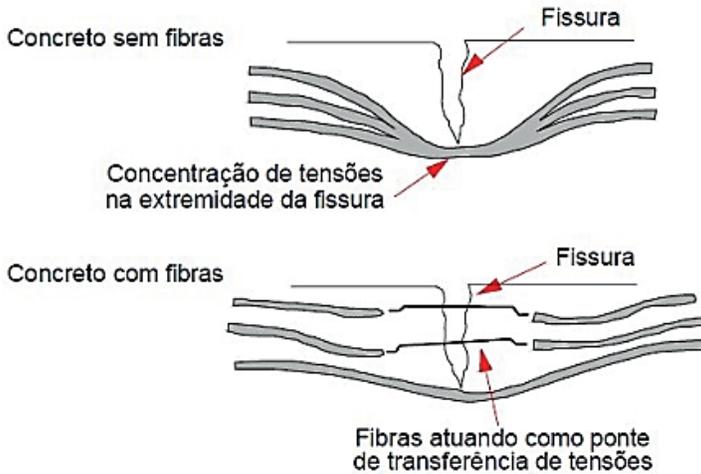


IMAGEN 1. Rendimiento de las fibras en la transferencia de tensiones dentro de la matriz cementicia.

Fuente: Medeiros (2012).

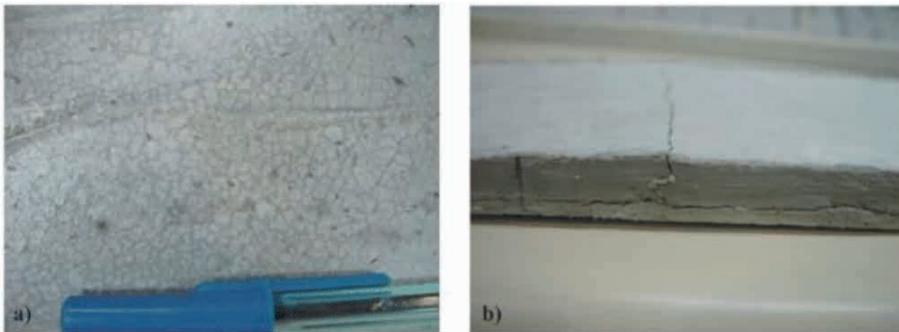


IMAGEN 2. Aparición de microfisuras mapeadas (a) y grietas (b) en compuesto cementicio debido a la degradación de la fibra vegetal incorporada.

Fuente: Lima *et al.* (2019).

DURABILIDAD DE COMPOSITOS CON FIBRAS VEGETALES

En los compuestos cementicios, las fibras vegetales pueden sufrir diversos grados de degradación cuando se exponen al ambiente alcalino y a la intensidad de este elemento, que viene determinada por las características de la fibra. Dependiendo del tipo de fibra y la solución alcalina utilizada, puede haber incompatibilidad entre la fibra y la matriz que puede clasificarse como incompatibilidad química que a su vez puede debilitar o petrificar la fibra, e incompatibilidad física, que puede causar pérdida de adhesión (SILVA, 2002).

El medio alcalino degrada principalmente la lignina presente en las fibras vegetales, haciéndola soluble, provocando la separación de las fibrillas de celulosa (desfibrilación) que hasta entonces estaban unidas por la lignina. La separación de los filamentos puede estar asociada a otros procesos de degradación como la petrificación, que también puede

estar asociada a la pérdida de tenacidad del composite a largo plazo, y la degradación severa debido a los continuos cambios en el volumen de fibras vegetales dentro de la matriz cementera (AGOPYAN *et al.*, 2005).

La pérdida de resistencia de estos compuestos con el tiempo se debe, en parte, a la alcalinidad de la matriz. El agua presente en los poros es altamente alcalina, provocando la disolución de hemicelulosa y lignina y la hidrólisis alcalina de las moléculas de celulosa, reduciendo el grado de polimerización y resistencia de las fibras. Además, los productos de hidratación, especialmente el hidróxido de calcio, migran a las paredes, lúmenes y huecos de las fibras, provocando la mineralización de las fibras. Se han realizado modificaciones en las matrices, como la sustitución parcial del cemento por material puzolánico, para obtener una matriz libre de hidróxido de calcio (FIDELIS, 2014).

APARICIÓN DE MANIFESTACIONES PATOLÓGICAS

Las fibras naturales se utilizan, sobre todo, para minimizar la aparición de grietas causadas por la retracción plástica del hormigón. Esta retracción puede tener varias causas, entre ellas, destacan la temperatura, el viento y el calor de hidratación del cemento. La incorporación de fibras se utiliza normalmente en pisos rígidos, pisos industriales, diseñados, áreas de piscina, premoldeados, morteros, tanques y depósitos, entre otros.

En los compuestos a base de cemento, la mayor adhesión de la matriz de fibra se logra a través de un mejor rendimiento de la zona de transición, haciendo que las dos fases trabajen juntas de manera efectiva. La mejor adhesión se logra reduciendo la porosidad y por la menor concentración de portlandita (cristales de hidróxido de calcio) en las proximidades de la fibra. En el caso de las fibras vegetales, se observa que la alta porosidad favorece la formación de grandes cristales de portlandita, que no se forman en la superficie de la fibra, sino más bien dentro de la zona de transición. Los desprendimientos de las fibras son visibles y se producen como resultado de su variación dimensional, al perder el agua absorbida durante la mezcla del compuesto (SAVASTANO JUNIOR, 2000). Estos desprendimientos, de gran incidencia en composites con fibras vegetales, constituyen un factor adicional para perjudicar la adhesión entre las fases.

Por lo tanto, pueden surgir grietas en la interfaz fibra-matriz debido a la gran diferencia en el coeficiente de expansión térmica entre la capa de interfaz y la fibra, además del agua almacenada en las fibras que contribuye al desarrollo de tensiones en la zona de interfaz entre las fibras y la matriz debido a la variación dimensional de las fibras (LIMA *et al.*, 2019), como se muestra en la imagen 3a. La alta incidencia de poros capilares, combinada con la masa específica reducida y la alta absorción de agua, puede inducir una rápida carbonatación de la matriz, causando daños al hormigón armado, al permitir la aparición de corrosión del refuerzo. La imagen 3b muestra una micrografía con observación lateral de la cavidad entre la fibra y la matriz.

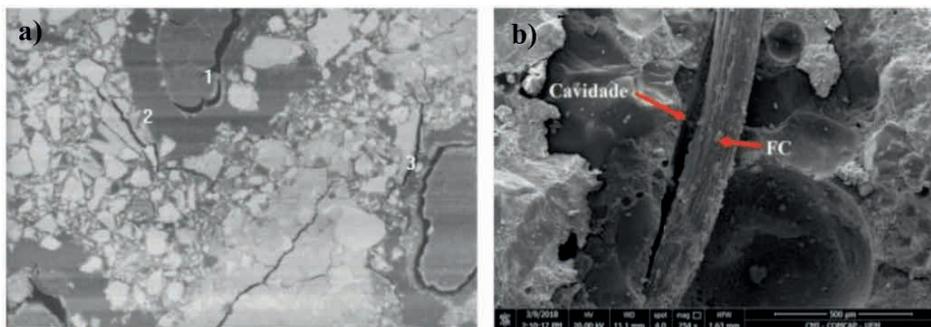


IMAGEN 3. Microestructura de composite cementoso con fibra vegetal, donde se observa en (a): (1) fibra desprendida de la matriz, (2) macrocristal de hidróxido de sodio y (3) microfisuras. Y en (b): cavidad entre fibra y matriz cementicia debido a una mala adherencia.

Fuente: Adaptado de Savastano Junior (20 00) y Capelin *et al.* (2020).

A través del ensayo de microscopía (SEM) realizado por Colonetti y Godinho (2017), fue posible visualizar indicaciones de vacíos alrededor de las fibras (Imagen 4), indicando la orosidad, lo que influye en la resistencia del hormigón y permite la entrada de agentes agresivos que causan manifestaciones patológicas y degradación.. Los poros visualizados en la microscopía mostraron que las fibras no tenían una interacción adecuada con la matriz cementicia, y pueden haber ocurrido debido a su degradación y expansión. Según Mehta y Monteiro (2014), si las fibras tienen poca adherencia con la matriz, pueden deslizarse bajo cargas bajas y no contribuyen mucho a reducir el agrietamiento del hormigón.

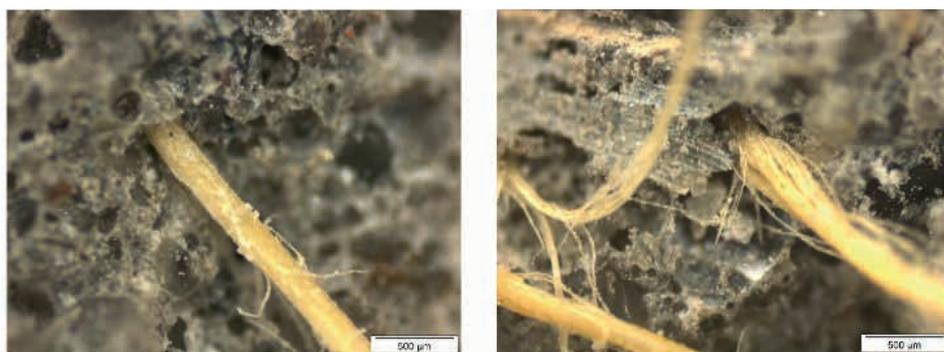


IMAGEN 4. Identificación de huecos en la zona de interacción fibra-matriz, que puede ser una de las causas de expansión de la fibra debido a su degradación.

Fuente: Colonetti y Godinho (2017).

Al analizar la composición química en las muestras por la prueba de difracción de rayos X (XRD) en muestras de concreto con incorporación de fibra vegetal (Imagen 5), Colonetti y Godinho (2017) pudieron observar además de los elementos comunes al concreto, una

gran presencia de óxido de magnesio (MgO), que es uno de los componentes secundarios del clínker de Portland. La forma de cristalización de MgO que queda sin reaccionar en el clínker, a su vez, se llama periclasio. Mehta y Monteiro (2014) mencionan que el MgO cristalino, cuando está presente en cantidad expresiva en el cemento, hidrata y puede causar expansión y agrietamiento del concreto. Aunque los elementos encontrados son comunes a los del hormigón convencional, es posible notar que hubo un posible ataque alcalino sobre la lignina de las fibras durante las fases de hidratación del hormigón, ya que no fue tratado, causando expansiones y grietas.

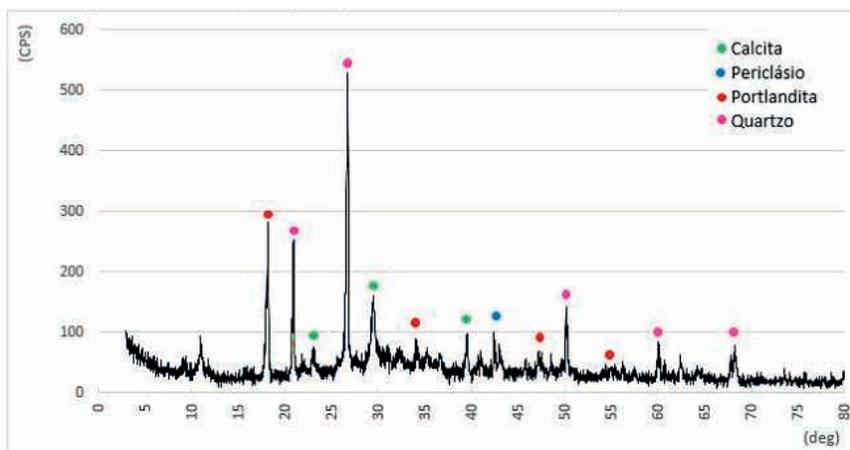


IMAGEN 5. Composición química por XRD de hormigón con incorporación de fibra vegetal.

Fuente: Colonetti y Godinho (2017).

APLICACIONES Y TRATAMIENTOS

Para desarrollar compuestos que tengan buenas propiedades físico-mecánicas es necesario mejorar la interfaz entre la matriz y el material lignocelulósico. Al mejorar la interfaz del compuesto, las propiedades de las fibras pueden mejorarse modificando sus componentes constituyentes a través de tratamientos químicos superficiales (LOPES *et al.*, 2011). Según un estudio realizado por Motta (2014), las modificaciones en la superficie de las fibras alteran propiedades como la adhesión y la absorción de humedad, y las modificaciones de los constituyentes estructurales alteran las propiedades de equilibrio, como la inestabilidad dimensional con la variación de la humedad.

Claramunt *et al.* (2011) realizó un estudio sobre la hornificación de fibras vegetales para mejorar la durabilidad de los compuestos cementicios. Los autores sometieron fibras de celulosa y pulpa de algodón a cuatro ciclos de humectación y secado y evaluaron el comportamiento mecánico de los compuestos producidos con estas fibras a través de pruebas de compresión y flexión. Los resultados indicaron que el tratamiento de las fibras

fue beneficioso en el comportamiento mecánico y la durabilidad de los compuestos. Los composites reforzados con fibras tratadas mostraron mayor resistencia a la flexión entre 8% (composites con pulpa de celulosa) y 16% (con fibra de algodón), que composites con fibras no tratadas.

Capelin *et al.* (2020) aborda los efectos de la fibra de coco en las propiedades de los morteros cementicios, y dichas fibras se trataron hirviendo, lavando con agua corriente y luego secándose al sol durante dos días. En consecuencia, este tratamiento tuvo una influencia directa en las características superficiales de las fibras, ya que eran superficialmente más compactas y rígidas. Sin embargo, experimentalmente fue posible probar que dicho tratamiento no fue efectivo para prevenir la degradación de las fibras en la matriz cementicia, porque se observó que había un debilitamiento en la zona de transición entre la fibra de coco y el mortero, causado por la baja efectividad del enlace fibra-matriz. En vista de esto, se pudo determinar que la adición de fibra de coco no contribuyó a la mejora de la resistencia a la compresión y también promovió la disminución del módulo de elasticidad. Sin embargo, en contraste, los ensayos mostraron que hubo una mejora significativa en la resistencia a la tracción cuando los morteros se someten a flexión.

En su investigación Silva *et al.* (2018) hizo una comparación de las propiedades resultantes en las pruebas de las muestras sin y con 10% de fibra de coco en relación con la masa de cemento Portland. Para evitar la degradación de estas fibras, al mezclarse con la matriz cementicia, se realizaron pruebas con diferentes tipos de tratamientos que implican el uso de materiales puzolánicos junto con látex natural. En primer lugar, se pudo comprobar que en los composites que presentan la fibra vegetal hay una disminución de la masa específica y un aumento del rendimiento termoacústico. Más específicamente, también se puede verificar que los ejemplares con fibras de coco tratadas con sílice activa en combinación con látex natural presentan un rendimiento más satisfactorio y una mayor durabilidad cuando se someten a envejecimiento acelerado y con respecto a la resistencia a la tracción en casos de flexión del compuesto. Se comprobó experimentalmente que con este tratamiento era posible reducir el proceso de degradación de las fibras y en consecuencia soportar un mayor esfuerzo mecánico.

En el trabajo de Lima *et al.* (2019) se puede observar la influencia que la fibra de sisal tiene sobre los compuestos cementosos bajo el efecto del envejecimiento acelerado, cuando se trata con material puzolánico. El experimento se resumió en la producción de dos compuestos laminados dosificados con cemento Portland y superplastificante a base de naftalina, donde uno tiene la adición de metakolinita y el otro no. El tratamiento de la fibra se centró en reemplazar un porcentaje del cemento con metacalinita, que tiene la propiedad de evitar la degradación de la fibra de sisal por mineralización cuando reacciona con el hidróxido de calcio presente en la matriz cementicia. Se comprobó a través de las pruebas que la metakolinita tiene la capacidad de consumir hidróxidos de calcio y que cuando se tiene en el compuesto un 40% de esta puzolana en la matriz no hay formación de ellos, lo

que puede provocar un exceso de metaolinita que es inerte en el compuesto generando el efecto de relleno. A continuación, se observa que la fibra de sisal no sufrió degradación relevante y continuó transfiriendo tensiones, sin embargo, se observó que la resistencia de inicio de agrietamiento sin y después del envejecimiento acelerado presenta mayores pérdidas de resistencia en comparación con el compuesto sin tratamiento. Además, se encontró que con los ciclos de envejecimiento acelerados el compuesto tratado sufrió choques térmicos, lo que resultó en microfisuras intensas, y como es menos resistente a la variación termohídrica también presentó grietas transversales y longitudinales.

La modificación química en la superficie de la fibra, utilizada en el buje vegetal, por el proceso de esterificación, reacción entre ácido carboxílico y alcohol, produciendo éster y agua, según la investigación de SOUZA *et al.* (2017) Se observa un aumento significativo de las propiedades físicas en las fibras modificadas y baja absorción en relación a la degradación de las mismas. El tratamiento utilizado en esta investigación se realizó con diferentes agentes como cloruro de lauroyl, cloruro de octanoilo y cloruro de estearoilo, e incluso variando algunas propiedades físicas, demostró ser una alternativa viable en el uso de fibras, destacando el procedimiento realizado con cloruro de octanoilo.

En la compatibilidad de las fibras con el cemento, según la investigación de Marques *et al.* (2016), con el proceso de lavado de las fibras de eucalipto, coco, cacao y baronesa, hubo una compatibilidad favorable para las fibras de eucalipto, coco y cacao y desfavorable para la fibra de baronesa, ya que esto no alteró la interacción con la matriz cementicia después del tratamiento. La técnica empleada se realizó mediante lavado con agua calentada a 90 °C. Así, se concluyó que el tipo de fibra determina qué tipos de tratamiento son viables y favorables para su uso como refuerzo en composites.

Oliveira *et al.* (2020) llevó a cabo en su trabajo el tratamiento de fibra por absorción de agua, con el uso de agua en un alto grado de temperatura, aplicado a la fibra de *Ureana lobata Linn.* Este procedimiento comenzó con el secado de las fibras al aire libre y luego se lavó con agua corriente, y finalmente se colocó durante 24 horas en un horno a 40 °C. Este método mostró una reducción en la absorción de agua de la fibra cuando se inserta en la matriz cementicia y una buena expectativa de durabilidad.

Otro tratamiento que resultó viable para la utilización de la fibra fueron las modificaciones en el proceso de curado del cemento, donde se deshidrató al vacío según la investigación de Urrea-Ceferino *et al.* (2019). Las fibras utilizadas en este estudio son de *Solombala pinus*. El compuesto cementicio se produce con la mezcla de cemento Portland, sílice molida y fibra de *Solombala pinus*, el proceso de curado se llevó a cabo cambiando la duración de la hidratación inicial, la exposición a la carbonatación y el envejecimiento acelerado.

CONSIDERACIONES FINALES/CONCLUSIONES

El hormigón reforzado con fibras vegetales es un hormigón único e innovador que puede ser utilizado como una alternativa viable al hormigón convencional para resolver los parámetros ambientales que les afectan. Este artículo aborda una revisión exhaustiva y conclusiones sobre los análisis de estudios actuales previos sobre la aparición de manifestaciones patológicas debido a la incorporación de fibras vegetales en compuestos de matriz cementicia, como hormigones y morteros. Según las investigaciones, se entendió que con la adición de fibras, se puede reducir el agrietamiento de la matriz, cuando se realiza un tratamiento adecuado, ya que las grietas están interconectadas por las fibras y, como resultado, hay un aumento en la tenacidad y resistencia a la tracción y al impacto. Por otro lado, este procedimiento tiene un alto grado de degradación cuando está presente en el medio alcalino de las matrices cementicias, por lo que requiere un tratamiento para ser utilizado como refuerzos de compuestos cementicios. Entre estos procesos de tratamiento se pueden mencionar la modificación superficial de la fibra, el lavado y los ajustes en el proceso de curación. Por lo tanto, se debe destacar la investigación en esta área para el uso efectivo de fibras vegetales en compuestos cementicios, compuestos de cemento Portland. A partir de esto, servirán de base para futuros estudios, siendo vital ampliar las buenas prácticas de sostenibilidad y durabilidad en la construcción civil.

REFERENCIAS

- AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIOR, H.; JUAN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Desarrollos sobre materiales a base de fibra vegetal-cemento en São Paulo, Brasil: Una visión general. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 527–536, 2005.
- ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; BARRA, M. Interacciones fibra-matriz en compuestos de mortero de cemento reforzados con fibras celulósicas. **Celulosa**, v. 18, pp. 281–289, 2011.
- CAPELÁN, L. J.; MORAES, K. K.; ZAMPIERI, J. P.; VANDERLEI, R. D. Evaluación de los efectos de la fibra de coco y la microcelulosa cristalina sobre las propiedades de los morteros cementosos. **Revista Matter**, v. 25, n. 1, 2020.
- CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; TOLEDO FILHO, R. D. La hornificación de fibras vegetales para mejorar la durabilidad de los composites de mortero de cemento. **Compuestos de cemento y hormigón**, v. 33, pp. 586–595, 2011.
- COLONETTI, L. M.; GODINHO, D. S. S. Estudio del efecto de la adición de fibras de sisal sobre las propiedades del hormigón. **Trabajo final (Ingeniería Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense**, Santa Catarina, 2017.
- DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. S. Revisión crítica de publicaciones recientes sobre el uso de compuestos naturales en infraestructura. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 8, p. 1419-1429, agosto de 2012.

FIDELIS, M. E. A. Desarrollo y caracterización mecánica de composites textiles cementosos reforzados con fibras de yute. **Tesis** (Doctorado en Ingeniería Civil) – Programa de Posgrado en Ingeniería Civil, Universidad Federal de Río de Janeiro, Río de Janeiro, 2014.

LEMOS, A. M.; FRENDEBERG, F. C. Estudio del uso de fibra de coco en vigas de hormigón. **Ciencias de la Ingeniería**, v. 7, n. 2, p. 1-8, 2019.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO HIJO, R. D.; NEUMANN, R.; BARROS, J. A. O. Efecto del envejecimiento acelerado sobre las propiedades del microhormigón reforzado con fibras largas de sisal. **Entorno construido**, v. 19, n. 1, enero / marzo 2019.

LOPES, F. F. M.; ARAÚJO, G. T.; LUNA, S.; NACIMIENTO, J. W. B.; SILVA, V. R. Modificación de las propiedades de las fibras de curauá por acetilación. **Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 316-321, 2011.

MARQUES, M. L.; LUZARDO, F. H. M.; VELASCO, F. G.; GONZÁLEZ, L. N.; SMITH, E. J.; LIMA, W. G. Compatibilidad de las fibras vegetales con el cemento Portland y su relación con las propiedades físicas. **Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental**, v. 20, n. 5, p. 466-472, 2016.

MEDEIROS, A. Estudio del comportamiento a fatiga en compresión de hormigón con fibras. **Tesis** (Doctorado en Ingeniería Civil) – Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro, Río de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Hormigón: microestructura, propiedades y materiales**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 págs.

MOTTA, L. C. Mejora del rendimiento de las fibras de coco y sisal para el refuerzo de matrices cementicias mediante tratamiento termomecánico e impregnación de resinas. **Tesis** (Doctorado en Ingeniería Civil) – Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo, São Paulo, 2014.

OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, A. L. B.; SMITH, J. L.; MARQUES, M. G. S.; VASCONCELOS, R. V.; OLIVEIRA, D. R. C. Influencia de los tratamientos superficiales en la absorción de agua y resistencia a la tracción de las fibras vegetales de *Ureana lobata Linn*. **Tecnia**, v. 5, n.1, 2020.

OLIVEIRA, M. S. Desarrollo y caracterización de baldosas cementicias reforzadas con tejido de fibras vegetales de la Amazonía. **Disertación** (Maestría en Ingeniería Civil) – Programa de Posgrado en Ingeniería Civil, Universidad Federal de Amazonas, Amazonas, 2017.

SAVASTANO JUNIOR, H. Materiales a base de cemento reforzados con fibra vegetal: reciclaje de residuos para construcción de bajo costo. **Tesis** (Doctorado en Ingeniería Civil) – Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo, São Paulo, 2000.

SILVA, A. C. Estudio de la durabilidad de composites reforzados con fibras de celulosa. **Disertación** (Maestría en Ingeniería Civil) – Departamento de Ingeniería Civil de la Construcción, Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo, São Paulo, 2002.

SMITH, E. J.; VELASCO, F. G.; LUZARDO, F. M.; MARQUES, M. L.; MILIAN, F. M. RODRIGUES, L. B. Compuesto cementicio con alto contenido de fibra de coco tratada: propiedades físicas y durabilidad. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.

SOUZA, J. D. G. T.; MOTTA, L. A. C.; PASQUINI, D.; VIEIRA, J. G.; PIRES, C. Modificación química superficial de fibras de buje vegetal con el objetivo de compatibilidad y aplicación como refuerzo en matriz cementicia. **Built Environment**, v. 17, n. 2, p. 269-283, abr/jun 2017.

URREA-CEFERINO, G. E.; PANESAR, D. K.; SAVASTANO JUNIOR, H. Ajuste de los parámetros de curado para compuestos de fibrocemento vegetal innovadores y duraderos. **Compuestos de cemento y hormigón**, v. 103, p. 121-133, 2019.