



CAPÍTULO

APROVECHAMIENTO DE FIBRAS VEGETALES Y RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO COMPONENTES DE COMPUESTOS A BASE DE CEMENTO



Julián Eduardo Mejía Ballesteros

7.1 INTRODUCCIÓN

El uso de materiales de construcción es una constante en la vida del ser humano. Se destaca el cemento como un material de elevado aprovechamiento a nivel mundial, lo cual se evidencia con su enorme presencia en la mayor parte de los centros urbanos e industriales.

Los materiales compuestos se definen como aquellos materiales en cuya formulación participan de manera conjunta por lo menos 2 materiales, con la premisa de que el nuevo material constituido presente características superiores cuando son comparadas con los materiales iniciales de forma individual. Así, un tipo de material compuesto son los denominados fibrocementos, entendidos como materiales a base de cemento no estructurales, sin agregados, con la posibilidad de presentar adiciones minerales y con fibras de refuerzo distribuidas a lo largo de la matriz. Hasta hace unas décadas, para reforzar el compuesto se utilizaban abiertamente fibras minerales, de forma específica el amianto crisotilo o también conocido como asbesto (Jamshidi y Ramezani-pour, 2011). Sin embargo, surgió un movimiento internacional en búsqueda de su prohibición, argumentando que el uso del mismo se encuentra asociado a problemas comprobados de salud sobre los trabajadores de la industria y posiblemente sobre los usuarios, lo que ocasionó la detención en su uso e incluso su explotación a nivel mundial. Una alternativa como material de refuerzo son las fibras sintéticas, que han mostrado un desempeño positivo, pero muestran una serie de desventajas en función de su costo elevado y de estar basadas en petroquímicos que las hacen un producto no renovable (Ballesteros et al., 2017).

El refuerzo del material se torna importante pues como es ampliamente entendido, los materiales a base de cemento presentan un destacable comportamiento mecánico cuando son sometidos a esfuerzos de compresión, pero muestran importantes limitantes en cuanto a esfuerzos de flexión se trata. Cuando fuerzas de este tipo actúan sobre el compuesto cementante, el mismo sufre una rápida ruptura y, por consiguiente, el fin de su vida útil (Ballesteros et al., 2015). Este desempeño mecánico frágil se da como resultado de que el material no posee la capacidad de absorber las fuerzas a las cuales es sometido, lo que lo lleva a su rompimiento. Una vez son incluidas fibras de refuerzo en la matriz, ocurren fenómenos que posibilitan la obtención de un material con mayor tenacidad, con lo cual se viabiliza la absorción de energía, ductilidad y mayor resistencia mecánica (Claramunt et al., 2016).

Dado lo anterior, se hace fundamental desarrollar técnicas o procedimientos y adelantar investigaciones utilizando materiales no convencionales que permitan obtener productos de fibrocemento alternativos y siempre con el intuito de presentar un desempeño similar o incluso superior a aquellos encontrados comercialmente. De esta manera, una línea de investigación indica la potencialidad del uso de fibras vegetales como material de refuerzo de compuestos cementantes (Almeida et al., 2013; Ballesteros et al., 2015).

El uso de fibras de origen vegetal trae consigo una destacable serie de beneficios, entre los cuales se destacan el carácter biodegradable de los mismos, su elevada disponibilidad a nivel mundial, especialmente en países tropicales y subtropicales, representar un recurso renovable, presentar un menor requerimiento económico para su extracción y producción y, por consiguiente, un menor costo en el mercado (Ishizaki et al., 2006); finalmente, las mismas exponen un desempeño mecánico positivo, lo que posibilita su uso con la finalidad de refuerzo (Claramunt et al., 2011).

Sin embargo, aun con las ventajas ya expuestas, el aprovechamiento de fibras naturales presenta una serie de limitantes importantes que frenan hasta cierto grado el aprovechamiento de este recurso. Como ha sido comprobado por diversas investigaciones, las fibras vegetales son susceptibles a degradarse dentro de la matriz de cemento, como resultado del grado alto de alcalinidad del mismo (Tian y Zhang, 2016), el cual puede llegar hasta un pH de 13. Otra problemática establecida ocurre como efecto de la capacidad de absorción de agua de las fibras, las cuales dentro de compuesto tienden a absorber el agua que entra por medio del sistema poroso de la matriz, generando variación volumétrica y acarreado una interfaz entre fibra-matriz debilitada pues básicamente la fibra se desprende de la matriz y su capacidad de refuerzo se ve comprometida (Claramunt et al., 2010).

A modo de solventar esta problemática, existe la posibilidad de realizar tratamientos sobre la matriz o sobre la fibra. En el primer caso, el objetivo se centra en modificar químicamente la matriz cementante favoreciendo un ambiente menos alcalino o neutro; por su lado, los tratamientos sobre las fibras pretenden modificar su estructura superficial o interna limitando su capacidad de absorción de agua (Luna et al., 2016). Estos tratamientos posibilitan el empleo de las fibras vegetales como mecanismo de refuerzo en fibrocementos no estructurales, aportando a un desarrollo sostenible por el uso de un material ambientalmente amigable y al afianzamiento de un mercado “verde”, sin mencionar la posibilidad de aprovechar desechos del sector agrícola, sin valor aparente, como materia prima que funciona como sustituto parcial de la matriz de cemento, conservando su desempeño y competitividad en el mercado.

7.2 FIBRAS VEGETALES

Las fibras naturales, o lignocelulósicas, están constituidas por una importante variedad de componentes como compuestos inorgánicos, grasas, carbohidratos simples, polifenólicos y pectinas, entre otros. Adicionalmente, han sido identificados tres compuestos que se establecen como sus constituyentes fundamentales, siendo ellos la hemicelulosa con un porcentaje en masa de 20 %-40 %, la lignina con un porcentaje en masa de 10 %-25 % y la celulosa con un porcentaje en masa de 40 %-60 % (Spinacé et al., 2011), cuyos valores varían en función del tipo de especie vegetal, de su edad, de la parte utilizada y de las condiciones ambientales y del suelo.

De manera general, como se puede observar en la figura 7.1, una fibra vegetal está conformada por un elevado número de fibrillas; las mismas presentan una estructura que se asemeja a un “tubo achatado” cuya cavidad central recibe el nombre de lumen. La pared celular de estas fibrillas se divide en cuatro partes, representadas por una pared celular primaria y tres paredes celulares secundarias. Estas paredes celulares están conformadas por microfibrillas de celulosa en una matriz junto con hemicelulosa y lignina, en donde esta actúa como aglomerante natural, pudiendo ser reunidas aproximadamente entre 30 a 100 cadenas celulósicas por cada microfibrilla (Fernandes et al., 2015).



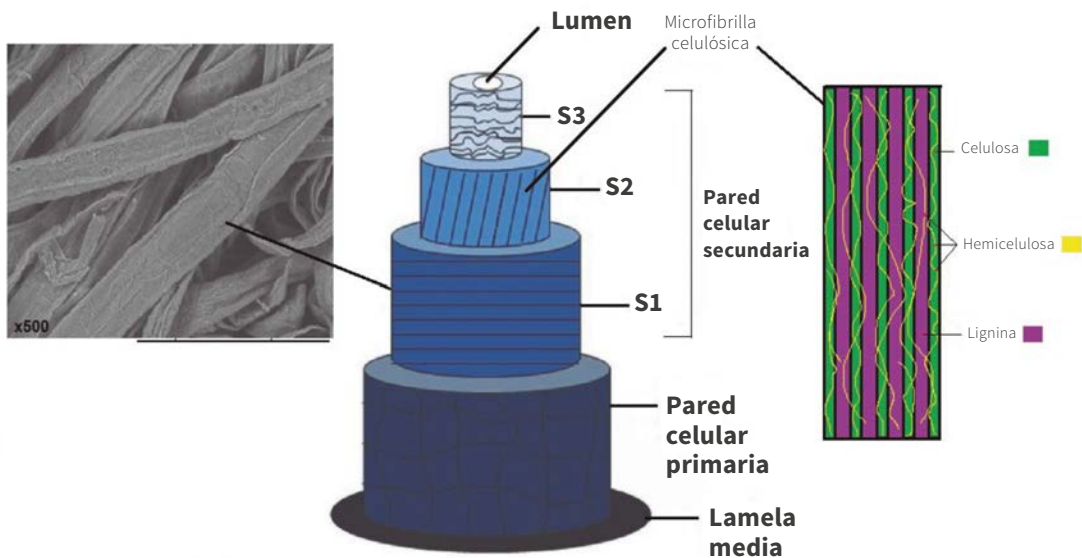
Estas paredes celulares están conformadas por microfibrillas de celulosa en una matriz junto con hemicelulosa y lignina, en donde esta actúa como aglomerante natural, pudiendo ser reunidas aproximadamente entre 30 a 100 cadenas celulósicas por cada microfibrilla (Fernandes et al., 2015).

De forma más específica, se indica que una fibrilla posee tres capas denominadas como lamela media, pared celular primaria y pared celular secundaria, la cual se subdivide en pared secundaria interna (S3), pared secundaria media (S2) y pared secundaria externa (S1). La lamela media presenta una composición dada por hemicelulosa, pectina y lignina; la pared celular primaria se constituye esencialmente por polisacáridos como la hemicelulosa y fibrillas de celulosa (en arreglos desordenados) y, finalmente, las paredes secundarias presentan principalmente microfibrillas de celulosa cristalinas, posibilitando la aparición de la estabilidad mecánica y resistencia de la planta.

En relación con el origen de las fibras celulósicas, se destaca que existen diversas fuentes como el algodón, el yute, el cáñamo, el lino y el sisal, entre otras. A su vez, su origen también puede proceder de cultivos tales como el coco, el trigo, el arroz y la caña de azúcar, entre otros. Sin embargo, a nivel global son las maderas las fuentes más comunes y aprovechadas de fibras naturales (Fernandes et al., 2015).

La amplia variedad de fuentes de este recurso también se encuentra relacionada con una destacable variación de sus características fundamentales; así, las fibras vegetales según su procedencia varían enormemente en lo que respecta a composición química y microestructura, la cual a su vez puede mostrar variaciones importantes como resultado de las condiciones ambientales del lugar de extracción, de las características del suelo, de la edad de la planta y del sistema de cultivo.

FIGURA 7.1 Representación esquemática de la pared celular de fibras celulósicas



Fuente: Adaptado de Fernandes et al. (2015)

CELULOSA

La celulosa se considera el polisacárido más abundante de la naturaleza; puede encontrarse ampliamente en el reino vegetal (Lavoine et al., 2012), en hongos, amibas y puede ser producida por ciertos animales marinos como los tunicados y algunas especies bacterianas (*Acetobacter xylinum*). La misma se expone como la molécula estructural de las plantas pues se encarga de destacable resistencia mecánica.

La molécula de celulosa se representa a partir de la fórmula química $C_6H_{10}O_5$. Se caracteriza por ser un polímero lineal rígido de hidrato de carbono, ser constituida por subunidades de glucosa, las cuales se unen por medio de enlaces β -1.4 y presenta la celobiosa como la unidad de repetición (Siqueira et al., 2010). Esta molécula puede alcanzar altos grados de polimerización, representados en largas cadenas de hasta 10 000 unidades de repetición, variando según la fuente de obtención (John y Thomas, 2008) y siendo el factor responsable del destacado desempeño mecánico de las plantas. De igual forma, presenta tres grupos hidroxilos en cada unidad de repetición, lo que le otorga su afinidad por el agua (Spinacé et al., 2011).

HEMICELULOSA

La hemicelulosa es definida como un polisacárido de cadena linear ramificada constituida a partir de diversos tipos de azúcares simples o de cadena corta como lo son la D-galactosa, D-manosa, D-xilosa, D-glicosa y L-arabinosa, entre otros (Chandel et al., 2007). Este componente de la pared celular de las fibras vegetales es considerablemente similar a la celulosa; no obstante, se caracteriza por presentar un grado de polimerización que resulta ser 10 o hasta 100 veces inferior (Jeronimo y Silva, 2013), ausencia de cristalinidad, elevada absorción de agua y baja masa molecular (Sanchez et al., 2010).

Esta molécula se consolida como el segundo mayor constituyente de las fibras naturales y se encarga de proporcionar refuerzo, como resultado de las relaciones con la celulosa, tanto a las paredes primarias como secundarias.

LIGNINA

La lignina es considerada la segunda macromolécula de mayor abundancia en la naturaleza y uno de los tres principales constituyentes de las fibras naturales después de la celulosa y hemicelulosa (Gadioli et al., 2014). Este componente vegetal se caracteriza por una estructura molecular bastante compleja y muy ramificada; además de ser

amorfa y tridimensional (Zeng et al., 2014), posee una destacable cantidad de grupos funcionales como lo son los grupos fenólicos, hidroxilos alifáticos y metoxilos (Gordobil et al., 2016), elevada resistencia a la degradación química y bioquímica, carácter fuertemente hidrofóbico (Ten y Vermerris, 2015), solubilidad en medios alcalinos con elevada temperatura, resistencia a la hidrolización por ácidos y facilidad de oxidación (John y Thomas, 2008).

La función básica de la lignina como constituyente de las fibras naturales es mantener unidas las fibrillas y microfibrillas, para lo cual, varias capas de este polímero se mezclan con la celulosa y hemicelulosa formando así el compuesto que constituye la pared celulósica de las fibras vegetales (Ten y Vermerris, 2015). De igual forma, este compuesto, al tener la capacidad de unir otros constituyentes, posibilita el surgimiento de la rigidez y resistencia mecánica de la pared celular (Fernandes et al., 2015).

7.3 APLICABILIDAD DE FIBRAS CELULÓSICAS EN COMPUESTOS DE CEMENTO

La definición más acertada de los fibrocementos indica que son materiales no estructurales a base de cemento u otro aglomerante hidráulico, con fibras de refuerzo distribuidas por la matriz, sin presencia de agregados y con la posibilidad de presentar en su formulación adiciones minerales. Cuando los compuestos a base de cemento son reforzados su comportamiento se distingue enormemente de aquellos sin refuerzo; en estos últimos, cuando se alcanza el valor máximo de resistencia a la flexión muestran una ruptura abrupta, sin ningún grado de deformación, destacándose como una característica típica de los materiales frágiles. En cambio, en un material compuesto reforzado una vez se alcanza y supera la deformación que corresponde a su resistencia máxima de flexión, su estructura interna posibilita el soporte de las tensiones más allá de esta etapa, pasando a exponer un comportamiento mecánico dúctil o semidúctil, permitiendo de esta manera un retraso en la fractura del material e incrementando su ciclo de vida útil. Este nuevo desempeño mecánico surge como resultado de la presencia de fibras de refuerzo que básicamente forman “puentes” de transferencia que permiten la absorción de tensiones y, con ello, una mayor distribución de microfisuras y fisuras, lo que a su vez genera una ruptura caracterizada por la progresividad. En otras palabras, es posible indicar que las fibras de refuerzo viabilizan el surgimiento de mecanismos que originan tenacidad en el material compuesto y de este modo un mejor desempeño mecánico.

Como se mencionó anteriormente, la transferencia de tensiones posibilitada por el refuerzo del material es una característica de fundamental importancia; debe existir una adherencia adecuada entre la fibra y el cemento para que esta condición sea cumplida (Faruk et al., 2012). La adherencia en esta interfaz fibra-cemento debe distinguirse por el anclaje y la fricción, que se dan como resultado de uniones de carácter físicas, químicas y fisicoquímicas entre la superficie de la fibra y la matriz de cemento. Por un lado, las uniones físicas se dan como consecuencia de la hidratación del cemento creando fases que se entrelazan entre ellas mismas y con las fibras de refuerzo; ya para el caso de las uniones químicas, estas se originan como resultado de la formación de puentes de hidrógeno entre fibra y matriz. Es de destacar que esta interfaz fibra-matriz debe ser lo suficientemente fuerte para garantizar el arrancamiento progresivo de la fibra de la matriz de cemento o también denominado “pull out”. Si la interfaz fibra-matriz es excesivamente fuerte, ocurrirá la ruptura de la fibra en sí; y si es débil, ocurrirá el desprendimiento de la fibra sin absorción de tensiones.

Otra situación para considerar es el tamaño de la fibra que va a ser utilizada como refuerzo. Longitudes menores de fibra permiten una mayor concentración de fibras por gramo, lo que favorece una distribución con mayor grado de homogeneidad dentro de la matriz de cemento (Jarabo et al., 2012). Así, las fibras de menor longitud se denominan fibras cortas (0,5-1,5 mm) y pueden ser obtenidas a partir de maderas “duras” como el eucalipto, también llamadas “hardwoods”. Por otro lado, fibras de mayor longitud regularmente son fibras más robustas y fuertes, de mayor resistencia, pero que en cierto grado tienden a aglomerarse entre sí generando defectos de refuerzo y deterioro de las propiedades mecánicas. Las fibras obtenidas de maderas “suaves” como el pino son representantes de las denominadas fibras largas (3-6 mm) o “softwoods” (Morton et al., 2010).

7.4 LIMITACIONES DEL USO DE FIBRAS CELULÓSICAS

Excluyendo las notorias ventajas y potencialidades del uso y aprovechamiento de fibras de origen vegetal, existen una serie de importantes limitantes que preocupan al sector de la construcción y que impiden un mejor posicionamiento dentro del mercado mundial de este tipo de productos; estos son la acelerada degradación de la fibra dentro del ambiente alcalino de la matriz de cemento Portland y su destacada afinidad hidrofílica.

El sobresaliente carácter alcalino de la matriz de cemento, con elevadas concentraciones de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o portlandita, se convierte en un ambiente agresivo para el componente constitutivo de las fibras celulósicas (Morton et al., 2010), ocasionando que, a lo largo del tiempo, el efecto de refuerzo del material de refuerzo desaparezca y así el compuesto pasa de nuevo a mostrar un desempeño frágil. Esta situación se da como resultado de un proceso denominado mineralización, caracterizado por la migración de productos de hidratación del cemento a la superficie e interior de las fibras vegetales, lo que genera una hidrólisis alcalina de la celulosa y sus demás constituyentes. Este proceso de degradación química reduce el grado de polimerización de las fibras y con ello reduce su resistencia mecánica (Almeida et al., 2013). De igual forma, la degradación de la lignina y hemicelulosa de lamela media debilita los enlaces entre las células individuales de la fibra.

El sobresaliente carácter alcalino de la matriz de cemento, con elevadas concentraciones de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o portlandita, se convierte en un ambiente agresivo para el componente constitutivo de las fibras celulósicas (Morton et al., 2010).

Según lo expuesto por Ballesteros et al. (2017), el ataque alcalino se origina como resultado de la dilución de portlandita por acción del agua, que en condiciones normales y naturales (como las lluvias) entra a la matriz de cemento por medio de su sistema poroso, generando un “agua alcalina” que a su vez consigue llegar hasta las fibras de refuerzo distribuidas en el material. Una vez ocurrido este paso y considerando la afinidad de las fibras celulósicas por el agua, estas absorben el agua alcalina y generan una variación dimensional de estas (expansión). Luego, en un periodo seco, las fibras pierden el agua absorbida (contracción) y el hidróxido de calcio se deposita en el interior y en la superficie de la fibra generando la mineralización ya mencionada. De igual forma, la variación dimensional reportada también desempeña un papel importante pues permite que la interfaz entre fibra-matriz se debilite debido a que la fibra se desprende de la matriz, afectando el desempeño mecánico del compuesto.

7.5 ALTERNATIVAS PARA POTENCIAR EL USO DE FIBRAS VEGETALES

Como resultado de la problemática existente en función del uso de fibras vegetales como refuerzo de compuestos de cemento, surgen diversas líneas de investigación para hacer frente a esta situación. En la actualidad existen principalmente dos líneas de acción que buscan ampliar la durabilidad del material celulósico de refuerzo: los tratamientos sobre la fibra o sobre la matriz de cemento (Ferreira et al., 2014).

Los tratamientos sobre las fibras son diversos; estos agrupan tratamientos físicos, químicos y fisicoquímicos que buscan alterar a conveniencia las propiedades de la fibra. Han sido utilizados gran variedad de agentes hidrófilos (como resinas, aceites, etc.) o revestimientos bloqueadores (como sulfato de sodio, sulfato de magnesio, etc.) que buscan modificar la superficie de la fibra antes de ser agregadas al compuesto y cuya finalidad es reducir su capacidad hidrofílica, logrando de forma adjunta menor variación volumétrica y por consiguiente posibilita constituir una interfaz fibra-matriz más estable (Ferreira et al., 2012), además de retardar el proceso de mineralización (Mohr et al., 2005). Estos métodos ya mostraron resultados parcialmente positivos pues no consiguen evitar completamente el proceso de mineralización o en su defecto, su aplicación se torna difícil o incrementa notoriamente el costo de la fibra.

En la actualidad, una alternativa es el proceso de hornificación; este método físico pretende modificar la estructura interna de la fibra reduciendo su porosidad y colapsándola para limitar su capacidad de absorción de agua (Köhnke et al., 2010). La misma se da como resultado de ciclos secuenciales de inmersión en agua y secado, lo que fomenta la formación de puentes de hidrógeno entre las microfibrillas de celulosa, ocasionando el colapso del lumen de la fibra y la reducción de la porosidad de la pared celular; esto, a su vez, reduce la disponibilidad de espacios vacíos en los cuales puede ser almacenada agua. Así, la hornificación se destaca como un tratamiento económico y simple (Ballesteros et al., 2017) y su influencia en la pérdida de la capacidad de variación dimensional trae beneficios como material de refuerzo pues permite mayor estabilidad volumétrica y con ello un mejor desempeño en la interfaz entre fibra-matriz (Ballesteros et al., 2015). Además de esto, esta modificación permitirá disminuir la incrustación de hidróxido de calcio en el interior de la fibra, reduciendo la mineralización y consecuente incremento de la durabilidad.

En relación con los tratamientos sobre la matriz de cemento, existe una amplia variedad de posibilidades, entre las cuales se destacan la sustitución parcial de la ma-

triz por materiales puzolánicos como subproductos de la agroindustria (Mármol et al., 2013; Mejía et al., 2019) o las curas del material en ambientes enriquecidos con dióxido de carbono (Ballesteros et al., 2019; Correia et al., 2015). En ambos casos, ocurren una serie de reacciones químicas que involucran a los productos de hidratación del cemento, permitiendo así la reducción de la alcalinidad del material y permitiendo de forma adjunta un mejor desempeño mecánico y físico del mismo (Pereira et al., 2013).

Dentro de la literatura internacional pueden encontrarse diversas investigaciones que profundizan la aplicación de la técnica de hornificación como pretratamiento de las fibras vegetales antes de ser incorporadas como material de refuerzo en la matriz de cemento. Así, los resultados expuestos por Ballesteros et al. (2015) indican la potencialidad de la técnica. Los autores utilizaron pulpas de pino blanqueado y eucalipto no blanqueado como refuerzo de una matriz de cemento y calcita. Para hornificar las fibras, las mismas fueron sometidas a cuatro ciclos de humedecimiento y secado. El humedecimiento se realizó por inmersión de las fibras en agua corriente durante 15 horas; luego, se les retiró el exceso de agua por medio de drenaje por vacío; una vez finalizado el paso anterior, la masa fibrosa obtenida fue desagregada y colocada en horno para el proceso de secado a 60 °C durante 7 horas. Este proceso significaba un ciclo de hornificación y el mismo fue repetido hasta alcanzar cuatro ciclos.

Para evaluar el desempeño mecánico y la durabilidad de ambos tipos de refuerzo en su estado hornificado y no hornificado, los autores moldaron una serie de placas cementantes (160 mm x 160 mm) como se detalla en la tabla 7.1. Estas placas fueron curadas de la siguiente manera: Una vez elaboradas las placas de fibrocemento, de manera individual fueron selladas en bolsas plásticas durante un periodo de dos días para llevar a cabo una cura saturada; luego, las placas se depositaron en un baño térmico con parámetros establecidos de 55 °C y 90 % humedad relativa para realizar la cura térmica durante un periodo de cinco días. Una vez finalizada la cura, las placas fueron cerradas y a partir de cada una se obtuvieron cuatro especímenes (160 mm x 40 mm x 5 mm). Se destaca que los autores trabajaron con 16 especímenes para cada formulación. Los 16 se dividieron en dos series con ocho representantes cada una; la primera serie fue ensayada mecánicamente una vez finalizado el proceso de cura y la segunda serie se sometió a un proceso de envejecimiento acelerado por medio de 200 ciclos de inmersión y secado (cada ciclo presenta una etapa de inmersión en agua durante 170 minutos y etapa de secado a 70 °C). El envejecimiento acelerado es una técnica que pretende simular el envejecimiento natural o las condiciones sol/lluvia a las cuales se vería sometido el material. Con ello, al finalizar el tratamiento, los autores evaluaron mecánicamente el desempeño de los especímenes de fibrocemento para determinar el grado de deterioro de la capacidad de refuerzo de la fibra.

TABLA 7.1 *Formulación de las formulaciones evaluadas*

Tipo de fibra	Formulación (% masa)			Cura	Envejecimiento/ES
	Cemento	Calcita	Fibra		
Eucalipto no blanqueado	68	27	5	CT	Si/8
					No/8
Eucalipto no blanqueado hornificado	68	27	5	CT	Si/8
					No/8
Pino blanqueado	68	27	5	CT	Si/8
					No/8
Pino blanqueado hornificado	68	27	5	CT	Si/8
					No/8

*ES: Número de especímenes

Fuente: Adaptado de Ballesteros et al. (2015)

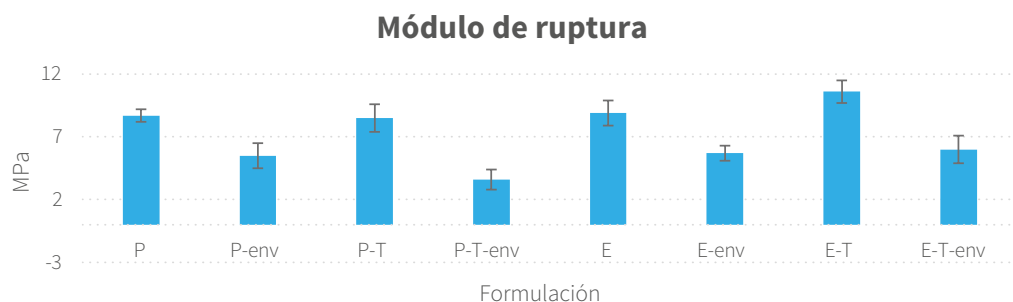
Una vez evaluado el desempeño mecánico de los fibrocementos, los autores determinaron que las propiedades mecánicas (figura 7.2) límite de proporcionalidad (LP) y módulo de elasticidad (MOE) no mostraron variaciones sobresalientes cuando fueron comparadas las formulaciones con el mismo tipo de fibra después de cura térmica. Una vez los especímenes evaluados fueron los envejecidos, los autores encontraron un incremento MOE, lo cual justifican con la continuidad del proceso de hidratación del cemento y algún grado de carbonatación. Los resultados referentes al módulo de ruptura (MOR) y energía específica (EE) se tornan especialmente importantes pues estas propiedades se relacionan estrechamente con el desempeño de la fibra como refuerzo del material. En este caso, los autores determinaron que para el material reforzado con fibra de eucalipto no blanqueada hornificada (E-H) se determinó un incremento superior al 19 % para los valores referentes a la propiedad de MOR. Para la formulación reforzada con pino blanqueado (P) al ser comparada con su contraparte reforzada con pino blanqueado hornificado (P-H), se presenta un incremento inferior a 5 %.

En relación con la EE, los autores encontraron que el refuerzo con P mostró valores superiores al refuerzo con E. Sin embargo, al ser evaluadas las fibras hornificadas, se determinó que los compuestos con fibras de E mostraron un incremento muy superior

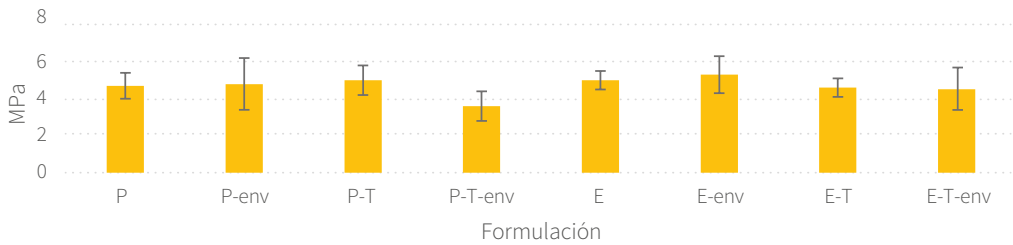
del desempeño representado por un porcentaje superior a 85 %. Los autores señalan este comportamiento como resultado de un mayor efecto del tratamiento de hornificación sobre las fibras de eucalipto. Por otro lado, cuando los autores estudiaron el desempeño de la propiedad EE para compuestos envejecidos y reforzados con pino blanqueado (P-env), pino blanqueado hornificado (P-H-env), eucalipto no blanqueado (E-env) y eucalipto no blanqueado hornificado (E-H-env), encontraron para todos los casos una reducción cercana a 90 % en el desempeño. Los autores informan que este resultado se da como consecuencia de la disolución y posterior precipitación en la superficie y e interior de las fibras, generando su degradación y pérdida de capacidad de refuerzo; de igual forma, la investigación resalta que el proceso de envejecimiento utilizado fue muy agresivo.

Aunque los resultados de la investigación de Ballesteros et al. (2015) evidencia que el proceso de hornificación permite un mejor desempeño de la fibra vegetal como material de refuerzo, los mismos también evidenciaron que el tratamiento como tal no consiguió evitar el deterioro de la fibra a lo largo del tiempo. Por otro lado, los autores continuaron con esta línea de investigación y a partir de los resultados expuestos en Ballesteros et al. (2019) explican que al refinar el proceso de hornificación alcanzaron una preservación de fibras de eucalipto no blanqueado hornificado como refuerzo de compuestos cementantes después de 200 ciclos de envejecimiento acelerado, comprobando así que este pretratamiento simple y económico es una alternativa destacada para combatir los limitantes al uso de fibras vegetales como refuerzo en fibrocementos.

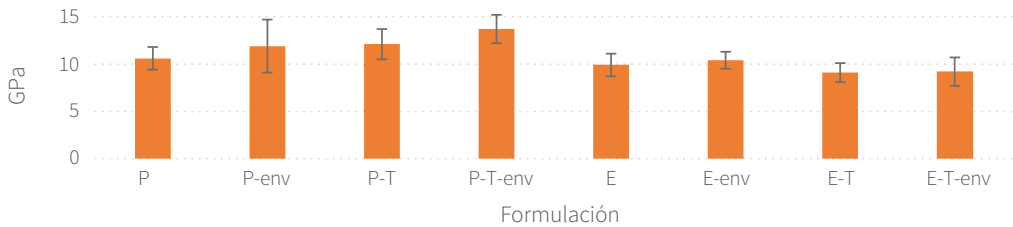
FIGURA 7.2 *Propiedades mecánicas evaluadas en los compuestos cementantes reforzados con fibras tratadas y no tratadas, antes y después del proceso de envejecimiento acelerado*



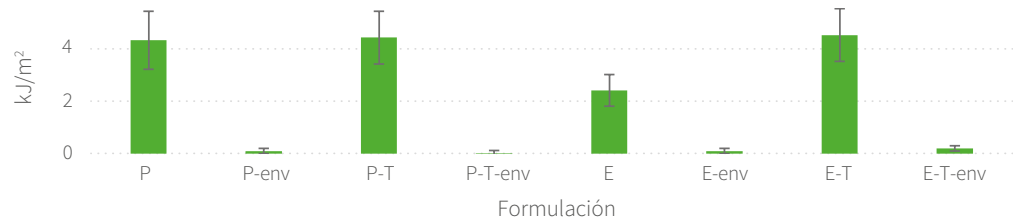
Límite de proporcionalidad



Módulo de elasticidad



Energía específica



Fuente: Adaptado de Ballesteros et al. (2015)

A modo de corroborar el efecto del proceso de hornificación sobre las fibras celulósicas, los autores procedieron a realizar una serie de evaluaciones para dicho fin. De esta manera, fue determinada la viscosidad, el índice de cristalinidad, el valor de retención de agua (tabla 7.2) y la microscopía electrónica de barradura (figura 7.3).

Los resultados expuestos por Ballesteros et al. (2015) indican que los valores de viscosidad no mostraron modificaciones importantes como resultado de la aplicación del proceso de hornificación sobre las fibras, situación que se torna importante cuando se define la estrecha relación de la viscosidad con el grado de polimerización de la molécula de celulosa, en donde reducciones indicarían que el tratamiento estaría deteriorando las cadenas celulósicas de las fibras. Por otro lado, el índice de cristalinidad mostro reducciones inferiores a 10 %, lo que según los autores era un comportamien-

to esperado y aceptable como resultado de cambios intramoleculares y remoción de componentes no cristalinos. Este resultado es destacable al considerar la importancia que tiene el grado de cristalinidad de la celulosa sobre el desempeño mecánico y físico de las fibras.

A partir de las consideraciones de los autores, el valor de retención de agua (VRA) es un ensayo fundamental pues permite definir con exactitud si la fibra está perdiendo o no su capacidad de retención/absorción de agua; por lo tanto, es una forma de medida indirecta del grado de hornificación alcanzado. Considerando lo anterior, los autores presentan valores inferiores de VRA para ambos tipos de fibra, después de ser aplicado el tratamiento de hornificación, indicando así la formación de puentes de hidrógeno y una aglomeración entre las microfibrillas de celulosa, que a su vez originan el colapso del lumen y el cierre del sistema poroso de la fibra. Los autores destacan que la fibra de eucalipto presentó un porcentaje mayor de hornificación (24 %) al ser comparada con la fibra de pino (10 %) y atribuyen este resultado a que la fibra de eucalipto fue obtenida en estado húmedo (nunca antes seca); la fibra de pino fue obtenida en forma de hojas secas.

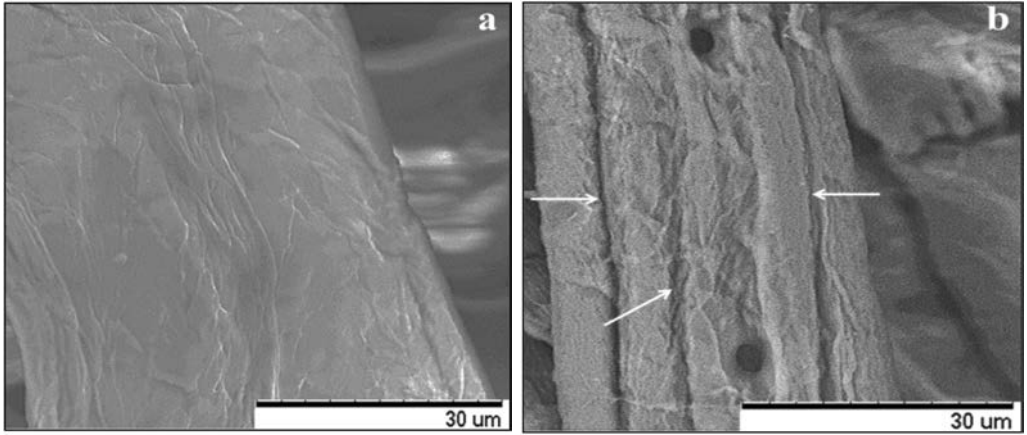
TABLA 7.2 *Propiedades físicoquímicas determinadas para las fibras celulósicas de eucalipto y pino tratadas y sin tratamiento*

Ensayo	Tipo de fibra			
	Pino blanqueado		Eucalipto no blanqueado	
	No hornificado	Hornificado	No hornificado	Hornificado
Viscosidad	730	725	919	848
Índ. de cristalinidad	81	77	82	73
Valor de retención de agua	123	111	221	168

Fuente: Modificado de Ballesteros et al. (2015)

En relación con los cambios microestructurales de las fibras, Ballesteros et al. (2017), por medio de la técnica de microscopía electrónica de barradura, observaron que el proceso de hornificación origina notoriamente el colapso de la fibra y de su lumen; hipótesis respaldada en el acercamiento observado entre los laterales de la fibra. Por otro lado, los autores rescatan que la superficie de la fibra se torna más rugosa, lo que favorecería a un mejor anclaje dentro de la matriz de cemento, lo que posibilitando una interfaz fibra-matriz más fuerte.

FIGURA 7.3 Microscopía electrónica de barradura para fibras de pino sin tratamiento (a) y hornificadas (b)



Fuente: Tomado y adaptado de Ballesteros et al. (2017)

A partir de los resultados obtenidos en la publicación abordada, se establece que es posible incrementar la durabilidad de las fibras naturales como refuerzo de matrices inorgánicas a base de cemento por medio de tratamientos como la hornificación, que, además, genera modificaciones a la estructura de la fibra permitiéndoles alcanzar un desempeño mecánico superior como material de refuerzo cuando es comparado con fibras sin tratamiento. Con esto, el autor concluye que las limitantes al uso de las fibras celulósicas dentro de los fibrocementos (degradación y variación volumétrica) pueden ser reducidas para potencializar el uso de este material ambientalmente amigable, renovable, biodegradable, abundante y económico dentro de la industria de fibrocementos no estructurales.

7.6 APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN COMPUESTOS DE CEMENTO

La generación de residuos agroindustriales es enorme a nivel mundial; muchos de estos residuos no presentan un adecuado manejo y gestión en relación con su disposición final, lo que ocasiona un impacto ambiental negativo de mayores proporciones que su propia producción. En la actualidad, existe una gran presión nacional e inter-

nacional en búsqueda de darle un manejo adecuado a estos residuos; más con las presiones de los mercados internacionales que cada día exigen a sus posibles socios y como requisito la denominada producción sostenible en todo el ciclo. De esta manera, surgen muchas líneas de investigación que buscan darle una solución concreta y viable a este tipo de residuos.

Dentro de la industria de la construcción el panorama no es diferente y existen fuertes presiones. El cemento Portland es un material de importancia estratégica a nivel mundial para el desarrollo social y humano (Frías et al., 2017); no obstante, es bien conocido que la industria cementera, como resultado de su proceso productivo, es culpada por liberar grandes cantidades de gases de efecto invernadero, donde se destaca el CO₂, generado en un valor superior a los 800 kg por cada tonelada de clinker que se produce (Hasanbeigi et al., 2010), representando de esta manera hasta el 8 % de la emisión antropogénica a nivel mundial (Benhelal et al., 2013). De igual forma, esta problemática obliga y condiciona al sector y a la comunidad investigativa a buscar alternativas o mecanismos que remedien o mitiguen la situación.

Considerando ambas problemáticas, una línea de investigación pretende aplicar el aprovechamiento de los residuos agroindustriales e industriales como materias primas de interés dentro del campo de los materiales de construcción, surgiendo de esta manera el concepto de sustitución parcial de la matriz de cemento y de manera derivada la sustitución parcial de la matriz por adiciones puzolánicas, todo enmarcado dentro de la teoría de economía circular.

Las puzolanas se definen como materiales siliciosos o silico-aluminosos amorfos que presentan un elevado potencial para reaccionar con el hidróxido de calcio productor durante los procesos de hidratación del cemento Portland, y el mismo es el encargado de generar el carácter básico del mismo (Mármol et al., 2013). Durante el proceso, ocurren una serie de reacciones donde se forman fases hidratadas similares a las obtenidas en la hidratación del cemento, favoreciendo el desempeño físico y mecánico del producto (Mejía et al., 2019). Adicionalmente, el uso de materiales puzolánicos representa una ventaja ambiental pues al reducir la cantidad de cemento utilizado se reduce la generación de CO₂ originado durante la producción de dicho cemento (Hesami et al., 2014). Esto, considerando las grandes cantidades de CO₂ liberadas a la atmósfera durante la producción de cemento, se torna sumamente importante y rescatable a nivel ambiental como forma de reducir el impacto generado.

Existen muchos materiales con características puzolánicas y muchos de ellos se obtienen a partir de residuos agroindustriales, como es el caso de la caña de azúcar y el bambú, entre otros. En este contexto, se destaca la cáscara de arroz, a partir de la cual se obtienen cenizas, que ya han sido usadas y estudiadas como sustitución parcial en compuestos de cemento. Actualmente se generan más de 100 millones de toneladas de cáscara de arroz, como subproducto de la industria arroceras (Wei y Meyer, 2016) y su disposición normalmente es inadecuada, lo que impacta negativamente al medio ambiente. Cuando se produce la ceniza de cáscara de arroz bajo condiciones controladas de temperatura se genera un material con elevado porcentaje de silicio amorfo, un material con gran desempeño puzolánico (Dias et al., 2017). Otra opción es el uso de residuos de la industria; en este sentido se destaca la industria de producción de carbón. Este sector productivo reporta una producción anual superior a los 7000 millones de toneladas (Statistical Review of World Energy, 2019) de las que entre el 10 % y 15 % pueden generarse como residuos de carbón, cuyo porcentaje varía considerando varios procesos industriales propios de su explotación (extracción, lavado, etc.).

Para activar las propiedades puzolánicas de estos residuos agroindustriales e industriales, los mismos deben ser sometidos a un tratamiento térmico con parámetros establecidos y controlados de temperatura (600 °C-800 °C) y tiempo de sometimiento, con lo cual se elimina el componente orgánico y el material pasa a exponer una composición química rica en sílice y alúmina (amorfos) que le otorga su desempeño puzolánico. Estudios alrededor del mundo ya mostraron las ventajas del aprovechamiento de los materiales puzolánicos a partir de residuos (Frías et al., 2015; Rodier et al., 2017); en ellos se expresa que su sustitución parcial por cemento acarrea una mejora en el desempeño mecánico y físico del material, además de reducir la absorción de agua por reducción del tamaño de poro del sistema poroso de la matriz, mejorar la interfaz fibra-matriz, reducir la alcalinidad de la matriz y permitir el incremento de la durabilidad de la fibra (Pereira et al., 2013).

Dentro de este contexto, en la investigación desarrollada por Mejía et al. (2019) trabajaron con matrices a base de cemento (C) con sustitución parcial por calcita, residuo de carbón activado (RCA) o ceniza de cáscara de arroz (CCA). Los autores utilizaron sustitución por calcita por ser una práctica común dentro de la industria de la construcción y RCA o CCA por ser materiales con características puzolánicas. Así, los autores informan que la materia prima base (residuo de carbón y cáscara de arroz) fue donada por empresa privada; paso seguido, se procedió a su tratamiento térmico para activación de las características puzolánicas por medio de horno de mufla con parámetros establecidos de 600 °C/2 h y seleccionados por mostrar buenos resultados dentro de la literatura consultada. Una vez fueron obtenidos los materiales de sustitución, se elaboraron especímenes de morteros con dimensiones de 4 cm x 4 cm x 16 cm y se sometieron a cura por inmersión en agua durante 7 y 60 días; a todas las formulaciones se les adicionaron 1350 g de arena estandarizada y se conservó una relación de agua/cemento de 0,5. Los autores evaluaron el desempeño mecánico en función de la resistencia a flexión y compresión de los especímenes a ambas edades con la finalidad de estudiar el comportamiento de las reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo pues, como lo informan, las reacciones puzolánicas suceden de forma progresiva. Las distintas formulaciones evaluadas por los autores pueden encontrarse en la tabla 7.3.

TABLA 7.3 *Composición de las formulaciones evaluadas*

Substitución	Formulación (% masa)			
	Cemento	Calcita	RCA	CCA
Formulación 1	100	0	0	0
Formulación 2	75	25	0	0
Formulación 3	75	0	25	0
Formulación 4	75	0	0	25

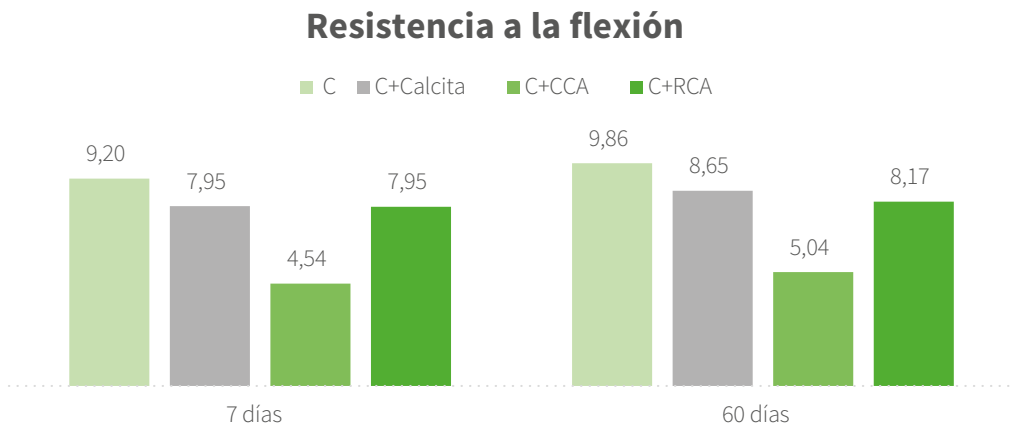
Fuente: Adaptado de Mejía et al. (2019)

A partir de los resultados expuestos por la investigación, al ser evaluada la resistencia a la flexión (figura 7.4) de los compuestos de cemento con y sin sustitución parcial a siete días de edad, fue identificada una reducción en los valores respecto de la formulación con 100 % cemento. Una vez evaluada la formulación después de 60 días de cura (figura 7.4), se observa para todos los casos un incremento en la resistencia a la flexión, en donde la formulación con 100 % cemento aún conserva el mejor desempeño. Al comparar las formulaciones con RCA y calcita, se observó un desempeño muy similar. Para el caso

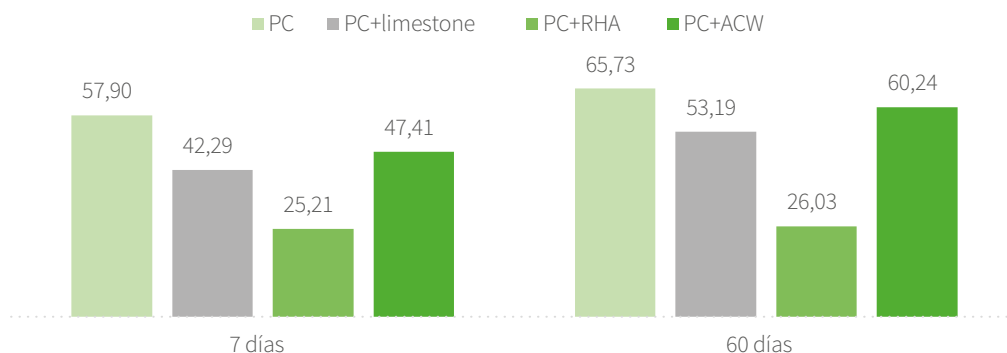
de la resistencia a la compresión (figura 7.4) a siete días de cura, la formulación con 100 % de cemento mostro el desempeño más destacable, seguido por la formulación con RCA y calcita, con una reducción de 18 % y 27 % respecto del desempeño del compuesto de 100 % cemento. Los especímenes ensayados a 60 días mostraron un incremento de resistencia a la compresión (figura 7.4) para todas las formulaciones evaluadas. Así, partiendo del desempeño de la formulación con 100 % cemento, se presentó una diferencia de aproximadamente 19 % y 8 % para las formulaciones con 25 % calcita y 25 % RCA respectivamente. Los autores destacaron que la formulación con RCA se mostró superior al ser comparada con los compuestos con calcita.

La investigación indica que los resultados encontrados son lógicos y consecuentes con otras publicaciones que utilizaron sustitución parcial por materiales puzolánicos. Los autores manifiestan que reducciones en el desempeño de la resistencia a compresión y flexión como resultado de la sustitución de cemento es un fenómeno esperado por el llamado efecto de dilución (Lawrence et al., 2003). De igual forma, para el comportamiento de las propiedades a la edad de 60 días, que mostraron una mejora en su desempeño, se daría como resultado de la continuidad de la hidratación del cemento y de las reacciones puzolánicas que toman parte. Los autores también destacan que ocurre la densificación de la matriz pues la portlandita es precipitada sobre los poros de la matriz reduciendo su tamaño.

FIGURA 7.4 Resultados de la resistencia a flexión y compresión para las formulaciones evaluadas con y sin sustitución parcial a 7 y 60 días



Resistencia a la compresión



Fuente: Adaptado de Mejía et al. (2019)

Se destaca que para aquellas formulaciones con 25 % de CCA, la reducción en los valores de resistencia a la flexión y compresión fue muy notoria, con un porcentaje de disminución de mínimo el 50 % tanto a siete días como a 60 días de cura. Los autores atribuyen este pobre desempeño de la sustitución por CCA al porcentaje utilizado, concluyendo que 25 % es un valor en exceso elevado, lo que dificulta los procesos de hidratación y compactación de la matriz pues la CCA posee una superficie específica muy elevada y, por tanto, una absorción de agua destacada que toma la mayor cantidad de agua del sistema.

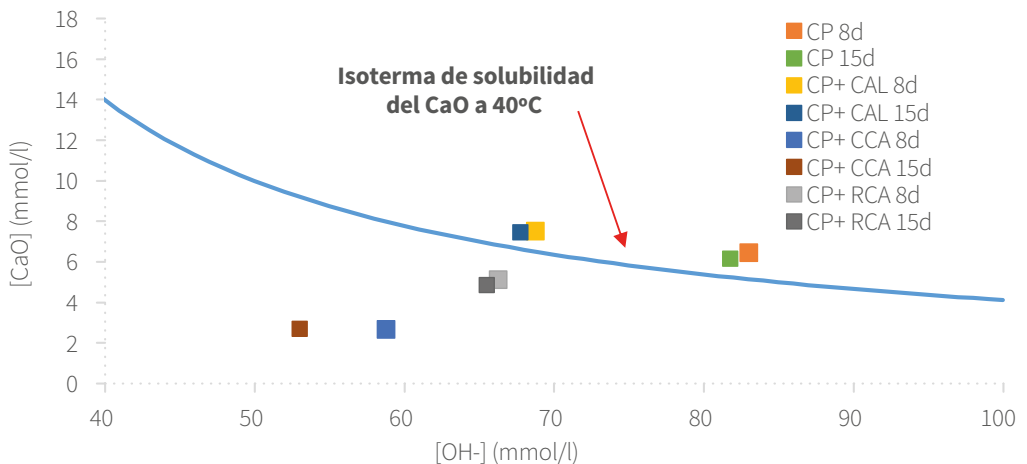
Para comprobar la capacidad de reacción del material de sustitución (caliza, RCA y CCA) con la portlandita, los autores aplicaron la metodología de Fratini a ocho y 15 días. Este ensayo permite la evaluación de la capacidad de reacción de un material con características puzolánicas con el hidróxido de calcio que es liberado durante el proceso de hidratación del cemento. Así mismo, se establece que esta metodología es diseñada para evaluar cementos puzolánicos. No obstante, como carácter orientativo, los autores aplicaron la metodología sobre las mezclas patrón y con sustitución parcial de calcita, que por constitución y literatura se establece que no poseen puzolanidad.

A partir de los resultados expuestos por la investigación y como puede observarse en la figura 7.5, se presenta la curva isoterma de solubilidad del CaO (óxido de calcio) y debajo de la misma se ubica el resultado para las sustituciones de cemento con CCA y RCA tanto para ocho como para 15 días. Considerando la definición del ensayo, que establece que un cemento es considerado puzolánico si su resultado, después de la valoración de los iones calcio e hidroxilo se encuentra por debajo de dicha curva, estas dos mezclas pueden catalogarse como de desempeño puzolánico. De forma general, los autores resaltan que las mezclas con CCA, mostraron ser más reactivas a la hora de

consumir $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y exhibir mayor disminución de la concentración de Ca^{2+} en comparación con las mezclas de RCA, lo cual puede tener su fundamento en el mayor contenido de sílice reactiva presente en el CCA (Antiohos et al., 2014). Como era de suponerse, tanto para el ensayo con 100 % de cemento como para la mezcla con sustitución de 25 % de calcita a ocho y 15 días, los resultados se ubicaron por encima de la curva, lo que indica que no presentan puzolanidad. Aunque estos resultados establecen un mejor desempeño puzolánico para la sustitución con CCA, los resultados mecánicos indicaron completamente lo contrario, lo cual, como fue expuesto por los autores, se debe a que 25 % de sustitución es un porcentaje excesivo de sustitución.

A partir de la investigación realizada por Mejía et al. (2019) se evidencia el potencial del uso de residuos tanto de la agroindustria como del sector industrial a modo de materiales con capacidad puzolánica y de sustitución parcial de materiales a base de cemento. La investigación de los autores evidenció que la sustitución reduce hasta cierto grado el desempeño mecánico del material cuando se compara con uno de 100 % cemento, pero esta reducción no es tan significativa como para que se convierta en una limitante del uso de la técnica. De igual forma, los autores indican que en la industria de materiales la sustitución por un porcentaje de calcita es una práctica aceptada y utilizada y, considerando que la sustitución por un mismo porcentaje de RCA permitió alcanzar un desempeño mecánico superior al ser comparado con los resultados determinados para la formulación con calcita, afirman la potencialidad de reincorporar residuos al sistema productivo de manera ambientalmente amigable y dentro de una economía circular.

FIGURA 7.5 Resultados del ensayo de Fratini para determinar la capacidad puzolánica de las formulaciones en estudio. CP: cemento, CAL: calcita, CCA: ceniza de cáscara de arroz, RCA: residuo de carbón activado



Fuente: Adaptado de Mejía et al. (2019)

7.7 REFERENCIAS

Almeida, A., Tonoli, G., Santos, S. y Savastano, H. (2013). Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cement and Concrete Composites*, 42, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.001>

Antiohos, S., Papadakis, V. y Tsimas, S. (2014). Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. *Cement and Concrete Research*, 61-62, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.04.001>

Ballesteros, J., Santos, S., Mármol, G., Savastano, H. y Fiorelli, J. (2015). Evaluation of cellulosic pulps treated by hornification as reinforcement of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 100, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.044>

Ballesteros, J., Dos Santos, V., Mármol, G., Frías, M. y Fiorelli, J. (2017). Potential of the hornification treatment on eucalyptus and pine fibers for fiber-cement applications. *Cellulose*, 24(5), 2275-2286. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1253-6>

Ballesteros, J., Mármol, G., Filomeno, R., Rodier, L., Savastano, H. y Fiorelli, J. (2019). Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. *Construction and Building Materials*, 205, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.007>

Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E. y Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142-161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>

Chandel, A., ES, C., Rudravaram, R., Narasu, L., Rao, V. y Ravindra, P. (2007). Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. *Biotechnology and Molecular Biology Review*, 2(1), 14-32. [http://www.academicjournals.org/bmbr/PDF/pdf2007/Feb/Chandel et al.pdf](http://www.academicjournals.org/bmbr/PDF/pdf2007/Feb/Chandel%20et%20al.pdf)

Claramunt, J., Ardanuy, M. y García, J. (2010). Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites. *Carbohydrate Polymers*, 79(1), 200-205. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.057>

Claramunt, J., Ardanuy, M., García, J. y Dias, R. (2011). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 586-595. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.003>

Claramunt, J., Fernández, L., Ventura, H. y Ardanuy, M. (2016). Natural fiber nonwoven reinforced cement composites as sustainable materials for building envelopes. *Construction and Building Materials*, 115, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.044>

Correia, V., Santos, S. y Savastano, H. (2015). Effect of the Accelerated Carbonation in Fibercement Composites Reinforced with Eucalyptus Pulp and Nanofibrillated Cellulose. *Materials and Metallurgical Engineering*, 9(1), 7-10. <https://publications.waset.org/10000145/effect-of-the-accelerated-carbonation-in-fibercement-composites-reinforced-with-eucalyptus-pulp-and-nanofibrillated-cellulose>

Dias, D., Lapa, N., Bernardo, M., Godinho, D., Fonseca, I., Miranda, M. y Lemos, F. (2017). Properties of chars from the gasification and pyrolysis of rice waste streams towards their valorisation as adsorbent materials. *Waste Management*, 65, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.011>

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. y Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552-1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Fernandes, P., De Freitas, M., Cioffi, M., De Carvalho, K., Milanese, A., Voorwald, H. y Mulinari, D. (2015). Vegetal fibers in polymeric composites: A review. *Polimeros*, 25(1), 9-22. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1722>

Ferreira, S., Lima, P., Silva, F. y Toledo, R. (2012). Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with portland cement matrices. *Revista Materia*, 17(2), 1024-1034. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762012000200008>

Ferreira, S., Lima, P., Silva, F. y Toledo, R. (2014). Effect of sisal fiber hornification on the fiber-matrix bonding characteristics and bending behavior of cement based composites. *Key Engineering Materials*, 600, 421-432. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.421>

Frías, M., Rodríguez, O. y Sánchez, M. (2015). Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials. A review. *Construction and Building Materials*, 74, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.007>

Frías, M., Rodríguez, O., Sánchez, M., Villar, E., Rodrigues, M. y Savastano, H. (2017). Advances on the development of ternary cements elaborated with biomass ashes coming from different activation process. *Construction and Building Materials*, 136, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.018>

Gadioli, R., Morais, J., Waldman, W. y De Paoli, M. (2014). The role of lignin in polypropylene composites with semi-bleached cellulose fibers: Mechanical properties and its activity as antioxidant. *Polymer Degradation and Stability*, 108, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.06.005>

Gordobil, O., Egúés, I. y Labidi, J. (2016). Modification of Eucalyptus and Spruce organosolv lignins with fatty acids to use as filler in PLA. *Reactive and Functional Polymers*, 104, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.05.002>

Hasanbeigi, A., Menke, C. y Price, L. (2010). The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1509-1518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.005>

Hesami, S., Ahmadi, S. y Nematzadeh, M. (2014). Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 53, 680-691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070>

Ishizaki, M., Visconte, L., Furtado, C., Leite, M. y Leblanc, J. (2006). Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: Influência do teor de fibra e das condições de mistura. *Polimeros*, 16(3), 182-186. <https://doi.org/10.1590/s0104-14282006000300006>

Jamshidi, M. y Ramezani-pour, A. (2011). Laboratory and industrial investigations on hybrid of acrylic and glass short fibers as an alternative for substituting asbestos in Hatschek process. *Construction and Building Materials*, 25(1), 298-302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.026>

Jarabo, R., Fuente, E., Monte, M., Savastano, H., Mutjé, P. y Negro, C. (2012). Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production. Effect on flocculation, retention, drainage and product properties. *Industrial Crops and Products*, 39(1), 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.017>

Jeronimo, C. y Silva, G. O. (2013). Estudo De Alternativas Para O Aproveitamento De Resíduos Sólidos Da Industrialização Do Coco. *Revista Monografias Ambientais*, 10(10), 2193-2208. <https://doi.org/10.5902/223613086935>

John, M. y Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343-364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>

Köhnke, T., Lund, K., Brelid, H. y Westman, G. (2010). Kraft pulp hornification: A closer look at the preventive effect gained by glucuronoxylan adsorption. *Carbohydrate Polymers*, 81(2), 226-233. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.02.023>

Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A. y Bras, J. (2012). Microfibrillated cellulose - Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate Polymers*, 90(2), 735-764. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.026>

Lawrence, P., Cyr, M. y Ringot, E. (2003). Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. *Cement and Concrete Research*, 33(12), 1939-1947. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00183-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00183-2)

Luna, P., Lizarazo, J. y Mariño, A. (2016). Guadua angustifolia bamboo fibers as reinforcement of polymeric matrices: An exploratory study. *Construction and Building Materials*, 116, 93-97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.139>

Mármol, G., Santos, S., Savastano, H., Borrachero, M., Monzó, J. y Payá, J. (2013). Mechanical and physical performance of low alkalinity cementitious composites reinforced with recycled cellulosic fibres pulp from cement kraft bags. *Industrial Crops and Products*, 49, 422-427. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.051>

Mejía, J., Savastano, H., Fiorelli, J. y Rojas, M. (2019). Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications. *Cement and Concrete Composites*, 98, 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.001>

Mohr, B., Nanko, H. y Kurtis, K. (2005). Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 435-448. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006>

Morton, J., Cooke, T. y Akers, S. (2010). Performance of slash pine fibers in fiber cement products. *Construction and Building Materials*, 24(2), 165-170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.08.015>

Pereira, C., Savastano, H., Payá, J., Santos, S., Borrachero, M., Monzó, J. y Soriano, L. (2013). Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber. *Industrial Crops and Products*, 49, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.038>

Rodier, L., Bilba, K., Onésippe, C. y Arsène, M. (2017). Study of pozzolanic activity of bamboo stem ashes for use as partial replacement of cement. *Materials and Structures*, 50(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0958-6>

Sanchez, E., Cavani, C., Leal, C. y Sanchez, C. (2010). Compósito de resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades Unsaturation polyester resin composite with sugar cane bagasse: influence of treatment on the fibers properties *Polímeros, ciência e tecnologia*, 20(3), 194-200. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000034>

Siqueira, G., Bras, J. y Dufresne, A. (2010). Cellulosic bionanocomposites: A review of preparation, properties and applications. *Polymers*, 2(4), 728-765. <https://doi.org/10.3390/polym2040728>

Spinacé, M., Janeiro, L., Bernardino, F., Grossi, T. y De Paoli, M. (2011). Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: Sisal vs. curauá. *Polímeros*, 21(3), 168-174. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000036>

Statistical Review of World Energy (2019). *BP Statistical Review of World Energy June 2017*. <http://oilproduction.net/files/especial-BP/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>

Ten, E. y Vermerris, W. (2015). Recent developments in polymers derived from industrial lignin. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(24), 1-13. <https://doi.org/10.1002/app.42069>

Tian, H. y Zhang, Y. (2016). The influence of bagasse fibre and fly ash on the long-term properties of green cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 111, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.103>

Wei, J. y Meyer, C. (2016). Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber. *Cement and Concrete Research*, 81, 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.12.001>

Zeng, Y., Zhao, S., Yang, S. y Ding, S. (2014). Lignin plays a negative role in the biochemical process for producing lignocellulosic biofuels. *Current Opinion in Biotechnology*, 27, 98-45. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.008>

