

Efecto de las fibras de coco sobre la resistencia a la flexión de mezclas de hormigón



Belén María Paricaguán¹

Carmen Lilian Albano²

Ronald Vladimir Torres²

Nelson Camacho²

Jeison Infante²

José Luis Muñoz²

Doctorante en Ingeniería área Química

Doctora en Materiales

Doctor en Cálculo Dinámico en Ingeniería Sísmica

Ingeniero en Química

Ingeniero en Química

Licenciado en Química

¹ UNIVERSIDAD DE CARABOBO. Facultad de Ingeniería. Avenida Universidad - 2005

Naguanagua (Venezuela). Tfno: + 58 241 8672928

² UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA. Facultad de Ingeniería. Avenida Paseo los Ilustres.

Ciudad Universitaria - 1050 Los Chaguaramos-Caracas (Venezuela).

Tfno: +58 212 6053062.

Recibido: 13/12/2012 • Aceptado: 10/06/2013

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5646>

EFFECT OF THE COCONUT FIBERS ON THE FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE MIXTURES

ABSTRACT

• Concrete is a brittle material and low resistance to flexo traction, due to their lack of ability to withstand deformation. These limitations could be overcome by incorporating a reinforcement, as natural fibers. The objective of this study was to analyze the effect of the coconut fibers treated and untreated PMMA on the flexural strength of concrete mixtures, as a substitute of part of a fine aggregate proportion of 2.5, 5 and 10% in volume. For this, we determined optimum design of concrete mixture to a water / cement ratio of 0.48, then the mixtures were prepared with untreated coconut fibers averages two lengths (3-4 cm; 5-6cm) and treated with PMMA (≤ 4 cm).

The concrete reinforced with chemically treated fibers with the PMMA, gave better results in the modulus of rupture at high temperatures, in the modulus of rupture to cycles of heat and moisture and presents a decrease in the loss of the water with the fibers without treatment; this was due to the fact that the fibers do not demeaned by the protection offered by the PMMA of chemical attack that with the time he produces the alkalized water by the alkali elements present in the cement. The highest values in the modulus of rupture were obtained for mixtures with 2.5 % and 5% of fibers treated short size. The tensile strength in bending of the mixtures at different temperatures exhibited markedly decreases when the temperature is above 200 ° C.

• **Keywords:** Flexural strength, reinforced concrete, coconut fibers, Materials Characterization, polymethylmethacrylate.

RESUMEN

El hormigón es un material frágil y de baja resistencia a flexo tracción, debido a su falta de capacidad para soportar deformaciones.

Estas limitaciones podrían resolverse incorporando un refuerzo, como las fibras naturales. El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de las fibras de coco -sin tratar y tratadas con PMMA- sobre la resistencia a la flexión de mezclas de hormigón, como sustituto de parte del agregado fino a las proporciones de 2,5, 5 y 10% en volumen. Para ello, se determinó un diseño de mezcla óptimo de hormigón para una relación agua/cemento de 0,48; luego se prepararon las mezclas con fibras de coco sin tratar a dos longitudes promedios (3-4 cm; 5-6cm) y tratadas con PMMA (≤ 4 cm).

El hormigón reforzado con las fibras tratadas químicamente con el PMMA, arrojó mejores resultados en el módulo de ruptura a altas temperaturas, en el módulo de ruptura a ciclos de calor y humedad y presenta una disminución de la pérdida del agua que con las fibras sin tratamiento; esto se debió a que las fibras no se degradaron por la protección que ofreció el PMMA del ataque químico que con el tiempo le produce el agua alcalinizada por los elementos alcalinos presentes en el cemento.

Los valores más altos en el módulo de ruptura fueron obtenidos para las mezclas con 2.5% y 5% de fibras tratadas tamaño corto. La resistencia a la tracción por flexión de las mezclas expuestas a las diferentes temperaturas disminuye notablemente cuando la temperatura es superior a 200 °C.

Palabras clave: resistencia a la flexión, hormigón reforzado, fibras de coco, caracterización de materiales, polimetilmetacrilato.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han incrementado las actividades de investigación y las aplicaciones que se están dando al hormigón reforzado con fibras en todo el mundo. La industria está interesada en las oportunidades de negocios: esto impulsa la continuación de nuevos avances en diferentes materiales fibroreforzados para su uso en la construcción.

Las fibras naturales pueden ser una posibilidad de uso para modificar las propiedades del hormigón en los países en desarrollo, ya que están disponibles en grandes cantidades y representan una fuente renovable continua [1]. No obstante estas fibras son afectadas principalmente por la alcalinidad de la matriz cementante del hormigón, haciendo que su durabilidad dependa de la protección que tengan las fibras.

El hormigón a base de cemento *Pórtland* es uno de los compuestos más versátiles en la construcción, pero existe la necesidad de modificar sus propiedades, tales como la resistencia a la tracción, dureza, ductilidad y durabilidad para aplicaciones más específicas. La utilización de materiales reciclados obtenidos de la naturaleza (material orgánico) para la elaboración de mezclas de hormigón permite reducir la cantidad de residuos, y a la vez disminuye la cantidad de materias primas a extraer, preservando así los recursos no renovables.

Con el desarrollo sostenible y la posibilidad de utilizar materiales alternativos de construcción, que permitan reducir la extracción y el uso de materiales convencionales [1], se inició la búsqueda de posibles sustitutos que le proporcionan al hormigón las mismas propiedades tan favorables que le otorgan los materiales convencionales. Entre las ventajas comprobadas de las fibras naturales están: sus significativas propiedades físico-mecánicas, tal como su resistencia a la tensión, lo que podría indicar que pueden ser consideradas como refuerzo en el hormigón; además su comportamiento dúctil después del agrietamiento de la matriz del hormigón; así como la longitud de las fibras adicionadas en bajas proporciones, es decir, con porcentajes bajos del volumen total de la mezcla, proporcionan al hormigón la capacidad para soportar mayores cargas de flexión en comparación con el hormigón tradicional.

La celulosa es la sustancia orgánica más abundante y el principal componente de las fibras naturales, son un constituyente esencial de los tejidos vegetales, cuya función es dar resistencia. Estas unidades contienen en su estructura tres hidroxilos de alcohol (-OH) que forman uniones de hidrógeno dentro de la misma macromolécula (intramolecular), entre otras macromoléculas de celulosa (intermolecular).

Todas las fibras de origen vegetal son de naturaleza hidrofílica [2]. Sin embargo, como la fibra es atacada por la alta alcalinidad del hormigón, es necesario realizarle un tra-

tamiento que reduzca la absorción de agua, así como la presencia de grupos oxhidrilos (OH^-). Por lo tanto, en el presente trabajo se caracterizaron las fibras determinando la densidad y la absorción de agua de las fibras sin y con tratamiento químico, se analizó el efecto de las fibras de coco sin tratar y tratadas con PMMA sobre la resistencia a la flexión de mezclas de hormigón para un tamaño corto(c) (3-4 cm), tamaño largo (l) (5-6cm) y distribución aleatoria para las fibras tratadas cortas con polimetilmetacrilato (PMMA) ($\leq 4\text{cm}$). Este estudio se realizó después de que las losas (de 2 litros de capacidad, con 200 mm de ancho, 200 mm de largo y 50 mm de altura) fueron curadas por 28 días (25 °C). También, se evaluó propiedades de resistencia a flexo tracción cuando se sometieron las losas de las diferentes mezclas a distintas temperaturas (200, 400 y 600 °C), así como a los efectos de los ciclos de calor y humedad; por último, se determinó la pérdida en peso debido a la eliminación del agua por el efecto de la temperatura de exposición. Esta investigación corresponde a los resultados de una primera fase de un proyecto de tesis doctoral, que se viene realizando en el Instituto de Modelización de Materiales Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela el cual tiene como objetivo estudiar el efecto de las fibras de coco sobre la resistencia a la flexión de mezclas de hormigón, con el fin de evaluar su comportamiento de manera que permitan encontrar la incidencia de algunos parámetros en la resistencia a la flexión del hormigón y su desempeño en el tiempo, como lo son tamaño de las fibras, tratamientos químicos, concentración porcentaje en volumen de las fibras, relación agua/cemento, porcentaje pérdida de agua, cambios bruscos de temperatura, entre otros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE COCO

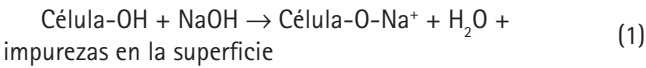
Se caracterizaron las fibras provenientes de los desechos de la Empresa Coconut Edo. Falcón, Venezuela, determinando la densidad de las fibras sin y con tratamiento químico, según la Norma COVENIN 268, [3], y la absorción de agua con el método de diferencia de peso entre las fibras a temperatura ambiente y las saturadas con agua.

Las fibras de coco sin tratar se cortaron en dos tamaños, corto (c), con un tamaño entre 3 y 4 cm y largo (l) con un tamaño entre 5 y 6 cm, y las fibras que fueron tratadas químicamente presentaron una vez cortadas un tamaño cuyas dimensiones son cortas con una longitud menor o igual a cuatro centímetros ($\leq 4\text{cm}$).

2.2. ACETILACIÓN DE LAS FIBRAS DE COCO Y TRATAMIENTO CON PMMA

Es un tratamiento muy efectivo que produce modificaciones en la superficie de la fibra natural, además de presentar bajos costos. La reacción del hidróxido de sodio con la

fibra natural (Célula-OH) se explica mediante la siguiente ecuación:



El tratamiento que se realizó a las fibras de coco, les confiere cierta aspereza y por lo tanto es posible lograr una mejor adherencia entre las fibras tratadas y la matriz cementante. Este tratamiento tiene dos funciones: primero, limpiar las fibras de impurezas provenientes del fruto durante su pelado (aceite, agua, pulpa, etc.) como durante su confinamiento (suciedad, polvo, etc.) y del ataque microbiológico por parte de hongos y levaduras [4]. Y segundo, protege a las fibras del deterioro debido a la alta alcalinidad de la pasta. El tratamiento químico de las fibras consistió en sumergirlas en soluciones de NaOH al 1% en masa a 25°C por 2 horas [5]. Posteriormente se lavaron con abundante agua para eliminar cualquier remanente de NaOH, luego se lavaron con una solución diluida de ácido acético al 1% y rápidamente con agua potable, seguido las fibras fueron secadas a 70°C por 72 horas y, por último, se sumergieron por 30 minutos en un recipiente que contenía PMMA, luego fueron retiradas y colocadas de manera esparcidas en una plancha de metal por 48 horas a temperatura ambiente, de manera que el polímero plastificara a las fibras, seguidamente se procedió a cortarlas según el tamaño en estudio y se dispuso en bolsas plásticas a una temperatura de 25°C.

2.3. DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA PATRÓN

Es importante mencionar que estas mezclas se hicieron con el objetivo de determinar la dosis óptima de las materias primas a conformar la mezcla patrón, siendo ésta la base para preparar las mezclas con las fibras sustituyendo parte del agregado fino. Inicialmente, se preparó una mezcla comercial; para ello, se preparó una mezcla de 395 kg/m³ utilizando la relación agua/cemento (a) de 0,48; se determinó el asentamiento de la mezcla mediante las relaciones fundamentales del hormigón con o sin aditivo. Se corrigieron las cantidades de cada uno de los componentes por humedad, para ello se elaboraron cinco (5) mezclas en cilindros de 5,3 litros de capacidad, cada uno de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto, en moldes de superficie interior lisa y de material no reactivo al hormigón (ver Tabla I) denominadas Mop1, Mop2, Mop3, Mop4 y Mop5. Una vez elaborados los cilindros permanecieron en reposo por 24 horas, luego fueron

Mezcla	Mop1	Mop2	Mop3	Mop4	Mop5
Cemento Pórtland Tipo III (Kg)	395	430	395	380	395
Agua (Kg)	189	194	190	182	190
Agregado fino (Kg)	765	797	890	902	890
Agregado grueso (Kg)	999	900	890	902	890
Relación agua/cemento (a)	0.48	0.45	0.48	0.48	0.48

Tabla I: Diseños mezcla patrón

Concentración de las fibras de coco (% vol.)		Patrón	2,5 %	5 %	10%
Componentes	Cemento (Kg)	60	60	60	60
	Agua (L)	27	27	27	25
	grava (Kg)	135	135	135	135
	Arena (Kg)	135	134	131	126
	Fibra de coco (Kg)	-	1,50	3,00	6,03
	Polyheed 1026 (L)	0,33	0,33	0,33	0,33

Tabla II: Cantidades usadas en la mezcla patrón fibras sin tratamientos para ambas distribuciones

Concentración de las fibras de coco tratada (% vol.)		2,5 %	5 %	10%
Componentes	Cemento (Kg)	60	60	60
	Agua (L)	28	26	28
	grava (Kg)	133	134	133
	Arena (Kg)	132	131	124
	Fibra de coco (Kg)	1,32	2,64	5,40
	Polyheed 1026 (L)	0,33	0,33	0,33

Tabla III: Cantidades usadas en la mezcla patrón fibras tratadas distribución aleatoria

desmoldados y almacenados hasta el momento del ensayo en agua saturada con cal. Posteriormente en el apartado 4.1 se realizó el análisis de estas mezclas y en consecuencia por qué se elige una de ellas como mezcla patrón.

Después haber determinado la “mezcla patrón”, se sustituyó parte del agregado fino por las fibras de coco en condición de saturación con superficie seca. Todas las mezclas con las cantidades reales de sus componentes se realizaron para 152 litros (ver Tabla II y III).

2.4. PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN CON LAS FIBRAS DE COCO

Las mezclas de hormigón de 2 m³ están constituidas por agregado grueso, (grava), agregado fino, (arena), agua potable, cemento, y fibras de coco. Las propiedades físicas y químicas de los agregados son mostradas en las Tablas (IV y

V). Debido a la reducción de la manejabilidad de las mezclas al adicionar las fibras, fue necesario el uso de un aditivo (*Polyheed 1026*), para obtener condiciones óptimas de mezclado y evitar la pérdida de su trabajabilidad [4], [6]. Para preparar las mezclas, se utilizaron 785 Kg de cemento *Pórtland* tipo III, el cual es de alta resistencia a edades tempranas, 1772 Kg de agregado grueso (grava, canto rodado) y 1702 Kg de agregado fino (arena lavada), según las Normas COVENIN 268, 255, 263, [3], [7,8]. Las mezclas se prepararon con fibras de coco sin tratar y tratada en sustitución de parte del agregado fino.

Propiedades	Agregado Grueso (Grava)	Agregado Fino (Arena)
Peso Específico (g/cm ³)	2,69	2,58
Porcentaje de Absorción de H ₂ O (%)	2,20	3,09
Peso Unitario Compacto (Kg/m ³)	1632	1818

Tabla IV: Características físicas de los agregados fino y grueso

Elemento	Cantidad máxima permitida (%)
MgO	6,00
SO ₃	4,50
Pérdida al fuego	37
Residuos insolubles	1.50
Aluminato tricálcico (3CaO-Al ₂ O ₃)	1.50

Tabla V: Especificaciones del cemento *Pórtland* tipo III marca VENCEMOS

Para las diferentes mezclas, se usaron 21,1 Kg de fibras de coco sin tratar para los dos tamaños de longitud y 9,4 Kg de fibras de coco tratada químicamente. Los porcentajes de fibras adicionadas a cada una de las mezclas, tanto de fibras sin tratar como tratada, fueron de 2,5, 5 y 10% en volumen. El porcentaje y tamaño de las fibras fueron definidos así, ya que fueron los que mejores resultados han dado en estudios con otras fibras [1], [4], [5], [6].

Debido a que las fibras tendían a aglomerarse. Se procedió a mezclar los ingredientes en seco (cemento, arena y grava) con las fibras, lanzando la mezcla hacia arriba para deshacer los grumos, y luego se le incorporó el agua. Este procedimiento permitió una mayor dispersión de las fibras en la mezcla, luego se continuó el procedimiento de mezclado, según la Norma COVENIN 354, [9]. (ASTM C 192).

2.5. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

La caracterización de la mezcla de hormigón en estado fresco se realizó determinando la fluidez de la mezcla y/o la

trabajabilidad a través del *Cono de Abrams* según la Norma COVENIN 339 (ASTM C 143), [10].

Siguiendo la Norma COVENIN 344, [11], se elaboraron para cada mezcla, las losas en moldes metálicos de 2 litros de capacidad con 200 mm de ancho, 200 mm de largo y 50 mm de altura. El proceso de curado de las losas se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en las Normas COVENIN 338 (ASTM C 31, C 39 y C 192), [12] y COVENIN 340 (ASTM C 192), [13]. Todas las losas, correspondientes a las diferentes mezclas, permanecieron en reposo y después de 24 horas de haber sido elaboradas, se procedió a desmoldarlas. Inmediatamente las losas fueron sometidas a un proceso de curado en tanque de agua durante 28 días. Estas son las losas que se utilizan para los diferentes estudios realizados en el presente trabajo. Para realizar los ensayos a flexión y determinar la resistencia, el equipo usado fue una Prensa Hidráulica con manómetro, Marca Baldwin, Modelo Universal con una capacidad máxima de 200 toneladas. Estos ensayos se realizaron de acuerdo a la Norma COVENIN 338 (ASTM C31, C39 Y C 192) [12].

Para las *pruebas al fuego*, se empleó un horno Termolyne marca furnatrol 11 serie N-85 FA1740-1, en él se colocaron tres losas de cada mezcla previamente pesadas por un período de 40 min, a temperaturas 200, 400 y 600°C respectivamente, se sacaron del horno, luego se dejaron enfriar a temperatura ambiente, y posteriormente se les realizaron los ensayos de flexión. También se ensayaron losas a temperatura ambiente sin ningún tratamiento para compararlas con las losas que fueron sometidas a las diferentes temperaturas.

Los estudios de *ciclos de calor y humedad* se realizaron para determinar el efecto de constantes fluctuaciones de temperatura y humedad, para ello se colocaron las losas de las diferentes mezclas en un horno a una temperatura de 100°C por 24 horas, luego se sacan y se colocan en agua a temperatura ambiente por 24 horas. Estos ciclos se repitieron tres (3) veces. Posteriormente se evaluaron las propiedades de resistencia a flexo tracción.

3. RESULTADOS

En la Fig. (1) se muestran las resistencias a la compresión de cilindros en función de la edad de curado para obtener la mezcla óptima, se experimentó con cinco mezclas. Como los valores de resistencia a la compresión de la Mop5, fueron los que tuvieron mejor desempeño, en cuanto a manejabilidad y asentamiento de la mezcla, se concluye que la Mop5, es la mezcla “Patrón” representando la mezcla óptima. En la Fig. (2) se muestran los valores de asentamiento obtenidos para las mezclas de hormigones con fibras de coco sin tratar y tratadas químicamente, puede observarse que el valor de asentamiento de las mezclas “Patrón” antes de adicionar las fibras se mantuvo cerca de los 8 cm.

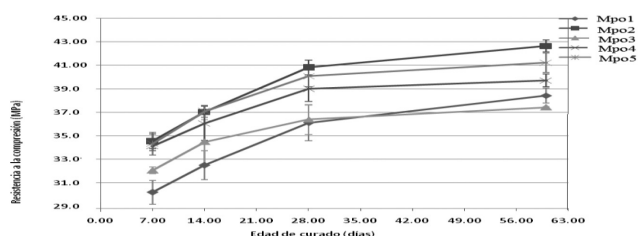


Fig. 1: Resistencia a la compresión de cilindros en función de la edad de curado para obtener la mezcla óptima

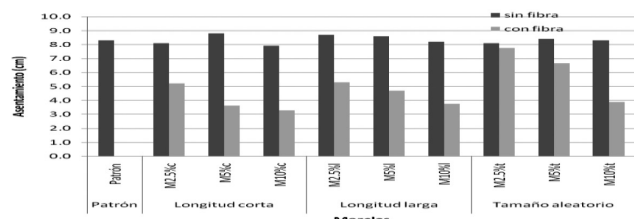


Fig. 2: Valores de asentamiento obtenidos para las mezclas de hormigones con fibras de coco sin tratar y tratadas químicamente. (c: corta; l: larga; t: tratada químicamente)

En las Fig. (3, 4 y 5) se muestran módulo de ruptura, de las mezclas de hormigones reforzados con fibras de coco de tamaño corto, largo y tratadas químicamente, sometidas a diferentes temperaturas. Tal como se aprecia, después de 200°C comienza el descenso en los valores del módulo de ruptura en forma más significativa.

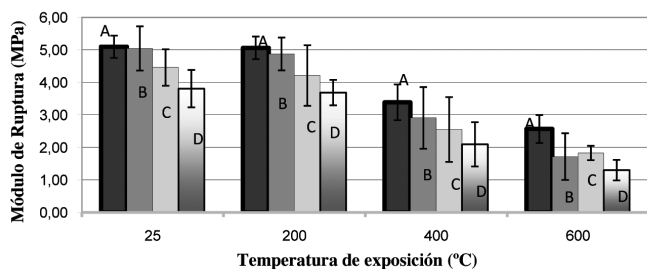


Fig. 3: Módulo de ruptura, de las mezclas de hormigones reforzados con fibras de coco de tamaño corto sometidas a diferentes temperaturas. (A) Mezcla patrón; (B), (C), (D) Concentración en volumen 2,5; 5 y 10% respectivamente

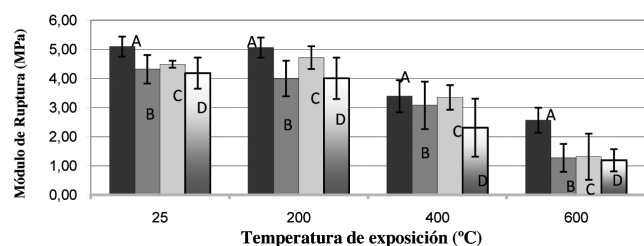


Fig. 4: Módulo de ruptura de las mezclas de hormigones reforzados con fibras de coco de tamaño largo sometidas a altas temperaturas (A) mezcla patrón (B), (C), (D) concentración en volumen 2,5; 5 y 10 % respectivamente.

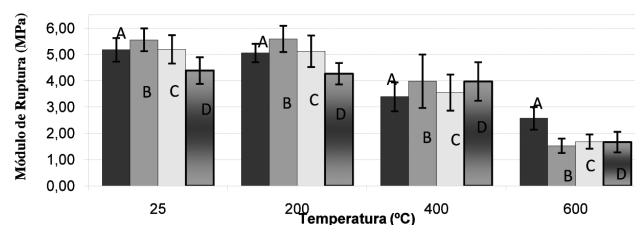


Fig. 5: Módulo de Ruptura de las mezclas de hormigones reforzadas con fibras de coco tratadas químicamente, sometidas a diferentes temperaturas. (A) mezcla patrón (B); (C); (D) concentración en volumen 2,5; 5 y 10 % respectivamente.

En la Fig. (6) se muestran los módulos de ruptura, de las mezclas de hormigones reforzados con fibras de coco de tamaño corto, largo y tratadas químicamente, sometidas a ciclos de calor y humedad. Tal como se observa, la mezcla con fibras tratadas al 2,5% de concentración en volumen fue la que obtuvo los valores más altos de módulo de ruptura.

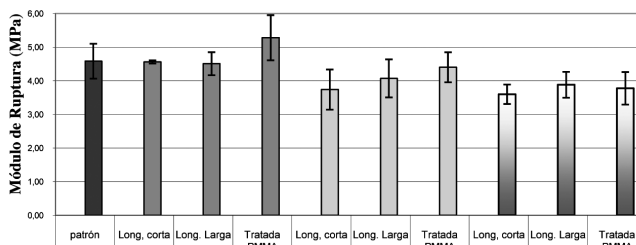


Fig. 6: Módulos de Rupturas de las mezclas de hormigones reforzados con las fibras de coco con y sin tratamiento, sometidas a ciclos de calor y humedad.

En las Fig. (7 y 8) se muestran las losas después de ser expuestas a 600°C y ensayadas; se aprecia que las fibras fueron calcinadas a esa temperatura y el color característico de las losas gris ahora es marrón oscuro.



Fig. 7: Losa después de ser ensayada y expuesta a 600 °C



Fig. 8: Losas reforzadas con fibras tratadas químicamente al 10 % en volumen sometidas a altas temperaturas

En las Fig. (9 y 10) se muestran las pérdidas de agua en las mezclas reforzadas con fibras de tamaño corto y con tratamiento y distribución de tamaño corto aleatoria sometida a las diferentes temperaturas de exposición. Con las fibras tratadas se evidencia una disminución en la pérdida de agua al compararla con las mezclas con fibras sin tratar, tamaños cortos sometidos a las mismas condiciones de temperatura y contenido de fibras.

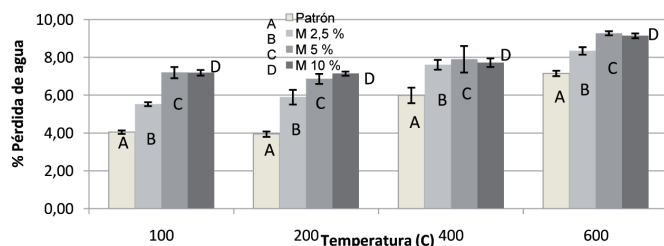


Fig. 9: Pérdidas de agua en las mezclas reforzadas con fibra sin tratamiento con distribución de tamaño corta sometidas a las diferentes temperaturas de exposición.

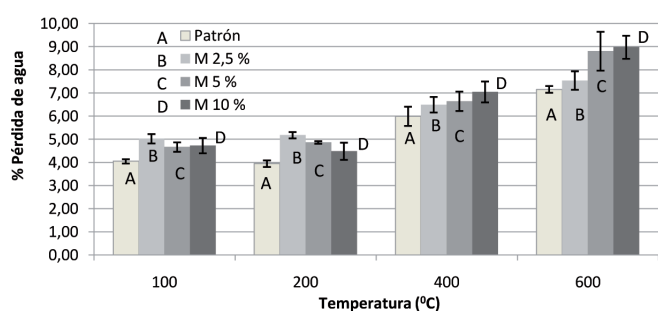


Fig. 10: Pérdidas de agua en las mezclas reforzadas con fibras con tratamiento y distribución de tamaño aleatoria sometidas a las diferentes temperaturas de exposición.

4. DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE COCO

La densidad promedio obtenida de las fibras sin tratamiento químico fue de $1140 \pm 15 \text{ Kg/m}^3$, coincidiendo con los datos reportados [14-15-16]. La densidad promedio de las fibras de coco sometidas al tratamiento químico fue de $1014 \pm 21 \text{ Kg/m}^3$. Existe una disminución en los valores reportados en la densidad promedio de las fibras al ser tratadas químicamente. Durante el tratamiento alcalino de las fibras se elimina cierta cantidad de lignina, hemicelulosa, cera y aceites que cubren la superficie de la pared celular de las fibras, por lo que disminuye la masa de la misma [17].

Con respecto a la absorción de agua promedio de las fibras sin tratamiento obtenidas hasta la condición de saturación, ésta fue de $155 \pm 11 \%$, coincidiendo con los datos reportados [14], y la de las fibras tratadas hasta la condición de saturación fue de $39 \pm 7 \%$. Esta disminución se debe a que el PMMA actúa como una barrera, evitando en gran

medida que las fibras absorban grandes cantidades de agua. También indican que por la naturaleza hidrofílica de las fibras naturales, estas absorben cantidades considerables de agua debido a la presencia de grupos (OH^-) [17]. En este sentido el porcentaje de disminución de la absorción de agua de las fibras tratada respecto a las fibras sin tratamiento fue del 75 % aproximadamente. De lo que se podría inferir que es posible que el proceso degradativo de las fibras tratadas sea más lento con el tiempo.

Al observar las fibras de coco a través de microscopia óptica, se tiene que las fibras sin tratar presentan una superficie irregular, en cambio las tratadas con NaOH y PMMA, se aprecia que las fibras están unidas y recubiertas por (PMMA) formando una red o conglomerado. A través de estudios de Espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), se observa que ocurren desplazamientos tanto en los grupos OH^- de las fibras de coco como en las bandas de PMMA, indicando que efectivamente ocurre una interacción entre ambos componentes.

4.1. OPTIMIZACIÓN DE LA MEZCLA PATRÓN

Para determinar la dosis óptima de cada componente de la mezcla, se parte de una fórmula comercial (Mop1) (Tabla 1). La mezcla Mop1 resultó ser bastante pedregosa, se alcanzó el asentamiento esperado de 4,5 cm para la mezcla sin aditivo. Al adicionarle 327,5 ml del mismo, el asentamiento aumentó a 7 cm, permitiendo que la trabajabilidad mejorara significativamente. En la mezcla Mop2 (Tabla 1) se aumentó la cantidad de pasta, se modificó la relación agua/cemento a 0,45; se incrementó la cantidad de arena y se redujo el contenido de piedra de la formulación Mop1, con el fin de lograr una mejor gradación del agregado e incrementar el comportamiento mecánico que se obtuvo en la mezcla Mop1, también se agregó 356,5ml de aditivo. El asentamiento para la mezcla Mop2, fue de 1cm, sin aditivo y 3cm con aditivo siendo estos valores muy bajos [18].

Seguido, se preparó otra mezcla denominada Mop3 (Tabla 1) en la cual se redujo la cantidad de piedra haciéndola igual a la cantidad de arena, se redujo la cantidad de agua con respecto a la Mop2 y mayor a la Mop1 y un valor de α de 0,48 igual a la mezcla Mop1, la cantidad de aditivo fue de 327,3ml. En esta mezcla, Mop3, antes de agregar el aditivo, se obtuvo un asentamiento de 8,5cm, y con la adición del mismo 315,1 ml, se alcanzó un asentamiento de 21 cm, el cual es muy alto. Por ello se preparó la mezcla Mop4 (Tabla 1), con una menor cantidad de agua, basándose en los resultados de asentamiento obtenido en la mezcla Mop3. Sin embargo, la mezcla Mop4 sin aditivo, resultó ser poco trabajable con un asentamiento de 2,5cm; al agregarse 315,1 ml de aditivo se observó un aumento del asentamiento a 7,2 cm. Por último se elaboró una mezcla denominada Mop5, a la cual se le agregó el aditivo en fracciones de 1/3 y 2/3 de 315,1 ml. En la Tabla 1 se observan las mezclas Mop 3 y Mop5, que coinciden con la misma dosis con respecto a las materias primas, sin embargo tienen comportamiento diferente ya que la variación está en el fraccionamiento de las

cantidades de aditivo que se le agrego a la mezcla Mop5. Los valores de asentamiento de esta mezcla Mop5 fueron de 4,5 cm para la mezcla sin aditivo y de 9 cm con aditivo. De estos valores de asentamiento discutidos, es posible inferir que tanto las mezcla Mop4 y Mop5 cumplieron con el asentamiento requerido y podrían ser cualquiera de las dos la mezcla “Patrón”. Por otra parte, en la Figura 1, se muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión de las mezclas Mop1, Mop2, Mop3, Mop4, y Mop5, donde se observa que la mezcla Mop2, tiene valores más altos de resistencia en comparación con la Mop5. Esto se debe a que esta mezcla se preparó con una menor relación de agua/cemento (α), no obstante Mop2 no cumplió con el asentamiento requerido.

La baja resistencia de la Mop1, se asocia a la presencia de una menor cantidad de pasta, lo que ocasionó la falla por desprendimiento del agregado producto de una mala adherencia. La Mop3, presentó la menor resistencia asociado a errores experimentales y la Mop4 mostró los valores relativos más cercanos a la Mop5. Como los valores de resistencia a la compresión de la Mop5, fueron los que tuvieron mejor desempeño, en cuanto a manejabilidad y asentamiento de la mezcla, se concluye que la Mop5 es la mezcla “Patrón” representando la mezcla óptima.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE COCO SIN TRATAR Y TRATADAS EN ESTADO FRESCO

Para que no ocurrieran cambios en la metodología de mezclado, se prepararon en conjunto la mezcla “Patrón” con cada una de las mezclas que contienen fibras de coco. En la Figura 2 puede observarse que el valor de asentamiento de las mezclas “Patrón” antes de adicionar las fibras se mantuvo cerca de los 8 cm. Las variaciones observadas (7,9 -8,8 cm) en el asentamiento de las diferentes mezclas “patrón”, se debieron a que los agregados se encontraban en condiciones desecantes, por lo cual la humedad de los agregados pudo presentar pequeñas diferencias. Al adicionar las fibras, la facilidad de procesamiento disminuye considerablemente con el contenido de fibras, indistintamente del tratamiento y longitud, lo que concuerda con lo obtenido por otros investigadores [19], [4], [1], [20]. Esto se debe a que a mayor contenido de fibras de coco es más difícil compactar la mezcla debido al enmarañamiento de las fibras. En cuanto a las mezclas con fibras de coco tratada, se pudo observar que la disminución del asentamiento fue menor a la disminución de los valores de asentamiento de las mezclas con fibras sin tratar para cada composición, y específicamente para 10% de fibras sin tratar. El concreto con fibras de coco tratadas, fue más fácil de trabajar, debido a que los tamaños de estas fibras eran menores o iguales a 4 cm y su distribución aleatoria permitió un mejor arreglo dentro de la matriz cementicia. Este comportamiento no presentó vacíos significativos, no se observó segregación, ni retracción de los agregados, para ninguna de las proporciones y distribución de las longitudes de las fibras de coco, independientemente si ésta, fuera tratada o no.

4.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE COCO SIN TRATAR Y TRATADAS EN ESTADO ENDURECIDO

En las Figuras 3, 4 y 5, se presenta el comportamiento de la resistencia a la tracción por flexión de las mezclas de hormigón con fibras de coco sin tratar y tratadas a temperatura ambiente y sometidas a diferentes temperaturas (pruebas al fuego). Se puede apreciar que el módulo de ruptura disminuye con el contenido de carga, siendo este efecto más pronunciado para el contenido de 10% de fibras de coco. Este se debe a que no existe una efectiva adherencia entre las fibras y la matriz cementicia [4]. Por otra parte, no se observaron cambios apreciables en los valores de esta propiedad mecánica, para ninguna de las mezclas en el intervalo de temperatura entre 25 y 200°C. [21]. Después de 200°C comienza el descenso en los valores del módulo de ruptura en forma más significativa. Esto se debe a dos factores: uno que la hemicelulosa de las fibras de coco comienza a descomponerse a partir de 180°C, y el otro que el proceso de descomposición de la celulosa y la lignina presente en las fibras de coco, comienzan a partir de 240 y 280°C, respectivamente, indicando que ya a 400°C de exposición se encuentra avanzada la descomposición de estos componentes, los cuales están afectando la disminución del módulo de ruptura [22].

Cuando la temperatura de exposición es de 600°C, ya se ha degradado toda la lignina [23], y por lo tanto se han carbonizado las fibras de coco. Estas fibras carbonizadas dejan espacios huecos en la matriz de hormigón y por lo tanto dan lugar a una disminución mayor del módulo de ruptura. En el caso de las mezclas de hormigón con fibras tratadas, no hay diferencia en el módulo de ruptura entre 25 y 400°C. Esto implica que el PMMA protege a las fibras de coco de la descomposición térmica de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Solo a 600°C el módulo decrece notablemente debido a que al degradarse el PMMA, comienza la descomposición térmica de los componentes de las fibras de coco, y por lo tanto perdiéndose la función protectora del PMMA [24]. Otro factor que tiene este efecto de disminuir los valores del módulo de ruptura de las mezclas, se debe al proceso de calcinación de los componentes del hormigón y a las reacciones internas de los mismos, los cuales pueden expandirse fuertemente con la temperatura (en el caso de los agregados), ocasionando tensiones que provocan la disgregación del hormigón, y causan la disminución de esta propiedad mecánica. Aunque los valores del módulo de ruptura de las mezclas con fibras sin tratar de tamaños promedio largas y cortas, no presentaron entre sí diferencias muy significativas, se observó ante la inspección visual que al ser examinadas las superficies de falla de las losas ensayadas, se comprobó que las fibras con distribución de tamaño corto normalmente tuvieron un tipo de falla por desprendimiento, mientras que las fibras con distribución de tamaño largo presentaron en mayor proporción fallas por fracturas, lo que podría indicar una mayor adherencia. Este comportamiento, fue independiente de la cantidad de fibras adicionada. También, se observó en la superficie de fractura de las losas ensayadas de las mez-

clas con 10% de fibras tratadas, que éstas fallaron por desprendimiento, por lo que se podría indicar, que no soportaron la carga aplicada.

4.5. MEZCLAS DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE COCO SIN TRATAR Y TRATADAS SOMETIDAS A CICLOS DE CALOR, HUMEDAD Y PRUEBAS AL FUEGO

Con respecto a los valores del módulo de ruptura cuando las losas de las diferentes mezclas se sometieron a tres ciclos de calor y humedad (Figura 6), se observa una disminución del módulo de ruptura en la medida que el contenido de las fibras se incrementa. Por otra parte, los módulos de ruptura para las losas de hormigón reforzadas con las fibras tratadas fueron ligeramente mayores que para las fibras sin tratar de 2,5 y 5% de fibras añadidas obteniéndose para las mezclas reforzadas al 2,5% tratada el valor promedio más alto. Este comportamiento indica que el tratamiento químico con el PMMA protege a las fibras de los cambios bruscos de temperatura y humedad a las que fueron expuestas durante los ciclos, lo que permite concluir que este polímero resiste a la intemperie y al envejecimiento térmico.

Realizando una observación cualitativa de las losas, se analizó el cambio de color, porosidad y fisuras que presentaron las losas en su superficie, al sacarlas del horno una vez expuestas a las diferentes temperaturas.

En la losa sometida a 200°C, se observa que al compararla con la losa de la misma mezcla sin exposición al fuego; no se evidencian cambios en la morfología superficial de las mismas, ya que son prácticamente iguales respecto al color gris característico del hormigón en su forma tradicional [21]. Este comportamiento se observó en todas las losas de cada una de las mezclas que fueron sometidas a esta temperatura. Cuando la exposición fue a 400 °C, la superficie de la losa está más deteriorada respecto a la losa sin exposición al fuego, ya que presentó un color marrón, el cual se debe a las reacciones químicas entre el óxido férrico con la caliza, que forman parte del hormigón. En la inspección visual, para esta temperatura, también se evidenció que el PMMA, se fundió fluyendo a la superficie de las losas a través de las grietas; al enfriarse las losas volvió a su estado sólido quedando expuestas en las superficies de las mismas. Aunque el hormigón no es un buen conductor del calor, para esta temperatura de exposición las losas alcanzan en su interior temperaturas superiores a la temperatura de fusión del PMMA. Cuando la temperatura de exposición fue de 600°C, se evidenció un notable cambio en la morfología de dichas losas, presentando un color negro característico de materiales degradados (ver Figuras 7 y 8).

4.6. PÉRDIDAS DE AGUA EN LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN CON FIBRAS DE COCO SIN TRATAR Y TRATADAS

La pérdida de agua de las mezclas con diferentes contenidos de fibras sin tratamientos (cortos y largos), debido a la exposición a las distintas temperaturas, el tamaño de las

fibras no afectó significativamente la pérdida de agua (ver Figura 9). Así mismo, en la medida que se incrementó la proporción de las fibras y la temperatura de exposición a las que fueron sometidas las losas de las mezclas, la pérdida en agua es mayor. Para el intervalo de temperatura 100 y 200°C la pérdida de agua estuvo entre un rango de 4 a 7,2% y recibe el nombre de agua evaporada que consiste en el agua capilar situado en los macroporos de las losas, así como el agua capilar contenidas en las fibras de coco.

Para la temperatura de exposición de 400°C, la pérdida en agua estuvo entre 6 y 8% tratándose del agua de gel que ha sido evaporada ubicada en los microporos de la pasta de cemento, una vez que se ha evaporado el agua capilar, la siguiente en evaporarse es el agua de gel.

Para la temperatura de 600°C, la pérdida en agua estuvo entre 7,2 y 9,3%, ésta se debe al agua zeolítica ubicada entre los extractos microcristalinos y en los intersticios de la pasta del hormigón.

El porcentaje de pérdida de agua de las mezclas de concreto con las fibras tratadas químicamente (2,5, 5, y 10%) y sometidas a altas temperaturas se observó que en el intervalo de exposición entre 100 y 200°C, el agua evaporada se encuentra en una rango de 4 a 5,2%, y para la temperatura de 600°C, la pérdida de agua entre 7,2 y 9% (ver figura 10). Esto evidencia una disminución menor de la pérdida de agua al compararla con las mezclas con fibras sin tratar, sometidas a las mismas condiciones de temperatura y contenido de fibras.

Esto se debe a que el PMMA, evita que se evapore parte del agua capilar contenida en las fibras, actuando de esta manera como una barrera protectora a la evaporación cuando éstas fueron sometidas a altas temperaturas. Solo a los 600°C, el porcentaje de pérdida de agua fue similar. A esta temperatura el PMMA se ha degradado, lo que implica una pérdida de la protección que este polímero ejercía sobre las fibras de coco [24].

5. CONCLUSIONES

El tratamiento químico que se le realizó a las fibras de coco con PMMA, no había sido estudiado antes, por lo que establece una base para futuros estudios y también constituye un ejemplo de cómo modificar y mejorar las propiedades del hormigón a partir de materiales fácilmente accesibles cuales son las fibras naturales.

La densidad promedio de las fibras de coco sometida al tratamiento químico y la absorción de agua presentaron valores más bajos en comparación con las fibras no tratadas.

La mezcla patrón seleccionada fue la Mop5, ya que presentó mejor manejabilidad, un asentamiento de 9 cm y una resistencia óptima.

El módulo de ruptura en el hormigón disminuye en la medida que aumenta la proporción en volumen de las fibras añadida en las mezclas de hormigón.

Las fibras de coco utilizadas en la elaboración de las lo-

sas reforzadas y ensayadas a una resistencia a flexo tracción, le imparte propiedades importantes al compuesto, principalmente a las losas con adiciones de fibras tratadas cortas con PMMA entre 2,5 y 5% en relación al peso total del agregado fino, y cuyas fibras con longitudes ($\leq 4\text{cm}$), las cuales alcanzan un módulo de ruptura por encima de 5 MPa a los 200 °C, estando por encima de las losas sin adiciones de fibras.

El hormigón reforzado con las fibras tratadas químicamente con el PMMA, arrojó mejores resultados en el módulo de ruptura a altas temperaturas, en el módulo de ruptura a ciclos de calor y humedad y presenta una disminución de la pérdida del agua que con las fibras sin tratamiento; esto se debió a que las fibras no se degradaron por la protección que ofreció el PMMA del ataque químico que con el tiempo le produce el agua alcalinizada por los elementos alcalinos presentes en el cemento.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Osorio J, Varon F, Herrera J. "Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra de bagazo de caña de azúcar". Dyna (74, N° 153): 69-79, 2007. ISSN 0012-7353
- [2] Fink HP, Ganster J, Fraatz J. "Akzo Nobel Viscose Chemistry Seminar Challenges in Cellulosic Manmade Fibers". Stockholm. Suecia, 1994.
- [3] COVENIN 268 (ASTM C 128). "Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción". 1998.
- [4] Juárez C, Rodríguez P, Rivera R, et al. (2004) "Uso de las fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto", Universidad Autónoma de Nuevo León (vol. VII, N. 22): 7- 19. ISSN 1405-9177
- [5] Cao Y, Shibata S, Fukumoto I. "Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments". Composites (37): 423-429, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.045>
- [6] Quintero S y González L. "Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto". Ingeniería y Desarrollo, Universidad del Norte N° 20, 134-150, 2006. ISSN 0122-3461
- [7] COVENIN 255 "Concreto granulometría agregados", 1998.
- [8] COVENIN 263 (ASTM C 29). "Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado", 1978.
- [9] COVENIN 354 (ASTM C 192). "Concreto. Método para mezclado de concreto en el laboratorio". 2001.
- [10] COVENIN 339 (ASTM C 143). "Concreto. Método para la medición del asentamiento con el Cono de Abrams", 1994.
- [11] COVENIN 344 (ASTM C 172). "Concreto fresco. Toma de muestra", 2002.
- [12] COVENIN 338 (ASTM C 31, C 39 y C 192). "Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto", 2002.
- [13] COVENIN 340 (ASTM C 192/ C 192M-02). "Concreto. Elaboración y curado de probetas en el laboratorio para ensayos a flexión", 2004.
- [14] Agopyan V, Savastano H, John V, et al. Developments on vegetable fibre-cement based materials in Sao Paulo, Brazil: an overview. (27):527-536, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.004>
- [15] Asasutjarit C, Hirunlabh J, khedari J, et al. Development of coconut coir-based lightweight cement borrad. Construction and Building Materials (21): 277-288, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.028>
- [16] Silva A. "Estudo da durabilidade de composites reforçados com fibras de celulose". Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [17] Sullichuamán ., Fuentes ., Ramos M, et al. "Materiales compuestos de cemento, papel reciclado, quitosano y refuerzo de fibras de sisal químicamente modificadas". 8º Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica, 2007.
- [18] Porrero SJ. et al. "Manual del concreto estructural". Caracas: SIDETUR , 2008.
- [19] Gutiérrez A y Matheus A . "Estudio a través de ensayos destructivos y no destructivos de las mezclas de concreto con Polietilentereftalato (PET) reciclado". Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2006.
- [20] Infante J y Alvarado M. "Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibra de coco mediante ensayos destructivos y no destructivos". Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2010.
- [21] Fernández M, C "Patología y terapéutica del hormigón armado", editorial dossat, Madrid, 389p., 1997
- [22] Bilba K, Arsene M, et al. "Study of banana and coconut fibers Botanical composition, thermal degradation and textural observations". Université des Antilles et de la Guyane. Bioresouce Technology volumen 98, issue 1, january. Pages58-68,2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.200511.030>
- [23] Mohan D, Pittman Ch, Steele P. "Pyrolysis of Wood/ Biomass for Bio-oil": A Critical Review. Energy & Fuels (20): 848-889, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ef0502397>
- [24] Kang B, Kim S, Kim J. « Thermal degradation of poly(methyl methacrylate) polymers: Kinetics and recovery of monomers using a fluidized bed reactor". J. Anal. Appl. Pyrolysis (81): 7-13, 2008. ISSN: 0165-2370 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2007.07.001>