

Studies of the mechanical properties of concrete reinforced with sugar cane bagasse fibers

Belén María Paricaguán Morales^{*,a}, José Luis Muñoz Cuevas^b

^a*Departamento de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Naganagua, Venezuela*

^b*Centro de Investigaciones Montana, Valencia, Estado Carabobo, Venezuela*

Abstract.- The use of organic waste materials for the production of concrete mixtures reduces the amount of solid waste and decreases the amount of raw materials to be extracted, thus preserving non-renewable resources. With the possibility of using alternative materials to reinforce and improve physical and mechanical properties of concrete, the effect on the resistance to compression and bending of concrete mixtures was analyzed by the use of sugar cane bagasse fibers as Partial substitute of fine aggregate at a proportion of 2,5 % in volume, for this purpose, a group of these were used in their natural state while another group underwent treatment with polymethylmethacrylate (PMMA). A water/cement ratio of 0,48 was used; mixtures with untreated fibers were prepared at two average lengths (3-4 cm short size; 5-6 cm long size) whereas with the fibers treated with PMMA an average length of random size ≤ 4 cm was used. The results obtained showed a notable improvement in the compression resistance in terms of the use of long-sized fibers with a tendency very similar to a non-fiber concrete, whereas with respect to the modulus of rupture in beams was lower than that of concrete traditional, however, the fibers in the concrete showed an efficiency of reinforcement in ductile failure and bridges in the formation of cracks, with a capacity of resistance when a load of final fault was reached.

Keywords: sugarcane bagasse; reinforced concrete; polymethylmethacrylate; polyheed 1026; acetylation.

Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar

Resumen.- La utilización de materiales de desechos orgánicos para la elaboración de mezclas de concreto permite reducir la cantidad de residuos sólidos, y disminuye la cantidad de materias primas a extraer, preservando así los recursos no renovables. Con la posibilidad de utilizar materiales alternativos para reforzar y mejorar propiedades físicas y mecánicas del concreto se analizó el efecto sobre la resistencia a compresión y flexión de mezclas de concreto mediante el uso de fibras de bagazo de caña de azúcar como sustituto parcial del agregado fino a una proporción de 2,5 % en volumen, para tal fin, un grupo de estas se utilizaron en su estado natural mientras que otro grupo fue sometido a tratamiento con polimetilmetacrilato (PMMA). Se usó una relación agua/cemento de 0,48; se prepararon las mezclas con fibras sin tratar a dos longitudes promedios (3-4 cm tamaño corto; 5-6 cm tamaño largo) mientras que con las fibras tratadas con PMMA se usó una longitud promedio de tamaño aleatorio ≤ 4 cm. Los resultados obtenidos evidencian una mejoría notable en la resistencia a compresión en cuanto al uso de las fibras de tamaño largo con tendencia muy similar a un concreto sin fibras, mientras que con respecto al módulo de ruptura en vigas fue menor a las del concreto tradicional, sin embargo, las fibras en el concreto mostraron una eficiencia de refuerzo en falla dúctil y puentes en la formación de grietas, con una capacidad de resistencia cuando se alcanzó una carga de falla final.

Palabras clave: bagazo de caña de azúcar; concreto reforzado; polimetilmetacrilato; polyheed 1026; acetilación.

Recibido: 22 de enero, 2019.

Aceptado: 26 de julio de 2019.

1. Introducción

A nivel mundial el concreto elaborado 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

^{*}Autor para correspondencia:

Correo-e: belenparicaguan@gmail.com (B.M. Paricaguán)

utilización de materiales reciclados obtenidos de la naturaleza (material orgánico) para la elaboración de mezclas de concreto permite reducir la cantidad de residuos, y a la vez disminuye la cantidad de materias primas a extraer, preservando así los recursos no renovables. Por este motivo y debido al acelerado crecimiento industrial, resulta de gran importancia e interés conocer los estudios realizados sobre este tipo de materiales, y de este modo tener una información detallada sobre su comportamiento y propiedades mecánicas en distintas condiciones de trabajo y de esta manera fomentar su aplicación en todos los campos de la industria en los que sus excelentes propiedades le confieren grandes beneficios respecto a otros.

En este orden de ideas, Osorio *et al.* [1], estudiaron la influencia del tamaño y de la adición de fibras expresadas en porcentaje del peso total, en la resistencia a compresión y en la densidad del material en la elaboración de concreto. Prepararon concreto (muestras patrón) y un compuesto concreto y de fibras de bagazo de caña de tamaño aleatorio, retenidas por un tamiz N° 6 entre el 0,5 y 2,5 % de fibras en relación al peso total del agregado grueso. Los resultados obtenidos de los ensayos arrojaron que el compuesto con bagazo presentó una resistencia a compresión a los 14 días de fraguado entre 8,6 y 16,88 MPa, y una reducción de la densidad entre 141 y 336 kg/m³, comparado con la de un concreto patrón de densidad promedia de 2400 kg/m³, aspecto importante para la consideración de cargas muertas por peso propio en estructuras.

Por otro lado, Sheikh y colaboradores [2] determinaron las fuerzas de compresión y de tensión entre una mezcla control de concreto y mezclas de concreto reforzadas con fibras de caña de azúcar. Además, el porcentaje en volumen de fibras de caña de azúcar utilizada fue de 0,5 %, 1,0 % y 1,5 %. La resistencia a compresión se determinó a los 7 y 28 días después de realizar la prueba de curado, mientras que la prueba de tracción de las mezclas de concreto con las relaciones de fibra de caña de azúcar utilizadas se analizó a los 28 días de curado. El resultado de la prueba mostró que el valor óptimo de aditivos de caña de azúcar es de 0,5 %, ya que para este

porcentaje se obtuvo el valor de la resistencia a la compresión más cercano a la mezcla control del concreto, mientras que el valor de la resistencia a la tracción es más alto que el obtenido para la mezcla control, observando además que la sincronización del concreto al agrietamiento se vuelve más lenta. Por lo tanto, el uso de fibra de caña de azúcar adecuada para la adición no supera a 0,5 % de la mezcla de concreto.

Las fibras naturales pueden constituir 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. No obstante, estas fibras son afectadas principalmente por la alcalinidad de la matriz cementante del concreto, haciendo que su durabilidad dependa de la protección que tengan las fibras. Asimismo, dependiendo del grado de polimerización de los componentes de las fibras existirá un mayor o menor grado de solubilidad en el medio acuoso o alcalino lo cual puede provocar pérdida de la resistencia mecánica por descomposición cuando son empleadas como refuerzo [3, 4]. La región central de las fibras es responsable de la gran incidencia de los poros permeables en las fibras, ya que absorben una elevada cantidad de agua [3].

Vijay y Arivalagan [5] estudiaron las fibras de sisal, el subproducto de residuos de material industrial se ha incorporado en el concreto estructural porque contribuye a reducir el uso de los recursos naturales. Estos estudios de investigación mostraron un aumento en la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de sisal con una ganancia hasta un 2 % y también mostró efectos de interacción sinérgica debido a las combinaciones de cenizas de bagazo de caña de azúcar (SBCA), en comparación con el concreto convencional (sin SBCA y fibra de sisal). La presencia de fibras de sisal en el concreto se mostró en falla dúctil con múltiples divisiones y puentes en la formación de grietas, cuando se alcanzó una carga de falla final.

Sudhakar y Babu [6]. Enfatizan que existe un aumento del 2,3 % en la resistencia a la compresión del concreto reforzado con fibra de sisal cuando se compara con el concreto de mezcla normal. Asimismo, en la resistencia a la flexión del concreto

se obtiene un valor de 9,18 % en la adición de fibra de sisal en la mezcla de concreto.

Esta investigación va de la mano con el desarrollo sostenible y la posibilidad de utilizar materiales alternativos de construcción, que permitan reducir la extracción y el uso de materiales convencionales, asimismo, estudia las propiedades mecánicas del concreto (cilindros y vigas) reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar mediante ensayos destructivos y no destructivos y se inicia la búsqueda de posibles sustitutos que le proporcionen al concreto las mismas propiedades tan favorables que le otorgan los materiales convencionales.

2. Materiales y métodos

2.1. Material

Las fibras de bagazo de Caña de azúcar, son procedentes del *Central Azucarero el Palmar* San Mateo, Edo Aragua, Venezuela, las muestras se depositaron en bolsas plásticas a 5 °C para evitar la proliferación de microorganismos que degradasen el material.

Las fibras de bagazo de caña de azúcar 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 con el proceso de acetilación y luego impregnadas con polimetilmetacrilato presentaron una vez cortadas, un tamaño cuyas dimensiones son cortas con una longitud menor o igual a cuatro centímetros.

2.2. Acetilación de las fibras caña de azúcar y tratamiento con polimetilmetacrilato (PMMA)

Las fibras de bagazo de caña de azúcar son producto de reciclaje, tienen carácter polar, absorben grandes cantidades de agua, contienen impurezas, polvo, microorganismos y estuvieron expuestas a procesos mecánicos. En aras de minimizar su deterioro dentro de la matriz cementante se recurrió a un tratamiento que consistió en limpieza, acetilación y polimerización con PMMA, [7, 8], además, la concentración de la solución de NaOH, el tiempo de tratamiento y la

temperatura son parámetros esenciales para evitar disminuir la resistencia de las fibras.

Es necesario resaltar que este procedimiento inicialmente se realizó en las fibras de coco contemplado en las investigaciones “contribución al estudio del comportamiento mecánico y físicoquímico del concreto reforzado con fibras naturales de coco y bagazo de caña de azúcar para su uso en construcción” [9] y “efecto de las fibras de coco sobre la resistencia a la flexión de mezclas de hormigón” [10]. Por lo tanto, al obtener extraordinarios resultados en las fibras de coco, fue aplicada la misma metodología para las fibras de bagazo de caña de azúcar.

2.3. Dosificación de las fibras

Para la dosificación de las fibras se prepararon mezclas tomando en consideración (0 y 2,5) % de fibras respectivamente con adición de fibras como reemplazo en parte del agregado fino. El porcentaje y tamaño de las fibras fueron definidos así, ya que fueron los mejores resultados han dado en estudios con otras fibras [1, 3, 4, 5, 6]. Se elaboraron mezclas donde permanecieron constantes la cantidad de cemento, grava y la relación agua/cemento ($a/c=0,48$), variando únicamente la cantidad de agregado fino representado por las fibras de bagazo tal como se observa en la Tabla 1. Se caracterizaron las mezclas en estado fresco y endurecido, todas las muestras se ensayaron a los 7, 14, 28, 60 y 128 días, excepto las vigas que fueron ensayadas a 28 días de curado.

Tabla 1: Componentes de la mezcla patrón y la mezcla reforzada con fibras de bagazo con y sin tratamiento para todas las distribuciones de tamaño corto, largo y aleatorio [10].

Componentes	Mezcla	
	Patrón	2,5 %
Cemento (kg)	60	60
Agua (L)	27	27
Grava (kg)	135	135
Arena (kg)	135	134
Fibra de bagazo (kg)	0	1,5
Polyheed 1026 (L)	0,33	0,33

2.4. Caracterización de las mezclas en estado fresco y endurecido

Debido a que en estado fresco la mezcla se hizo menos trabajable al incorporar las fibras de bagazo de caña de azúcar, fue necesario añadir un aditivo químico llamado polyheed 1026, aumentando notablemente la manejabilidad de la mezcla.

Los cilindros fueron elaborados de acuerdo a lo establecido en la Norma Venezolana Covenin 344:2002 [11], la caracterización de la mezcla de concreto en estado fresco se realizó determinando la fluidez y/o la trabajabilidad, a través, del ensayo del *Cono de Abrams* según lo estipulado en la Norma Venezolana Covenin 339:2003 [12], mientras que el proceso de curado de las probetas cilíndricas, se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en las Normas Venezolanas Covenin 338:2002 [13] y Covenin 340:2004 [14].

Por otro lado, la elaboración de vigas se realizó siguiendo el procedimiento de la Norma Venezolana Covenin 342:1979 [15]. Asimismo, con el fin de 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 bagazo de caña de azúcar.

2.5. Ensayos

Los estudios mecánicos realizados a los cilindros consistieron en ensayos de compresión para determinar la resistencia, para lo cual se evaluaron a las edades de 7, 14, 28, 60 y 128 días.

El equipo que se utilizó para los ensayos fue una Prensa Hidráulica con indicador de carga, Marca *Baldwin*, Modelo *Universal* con una capacidad máxima de 200 toneladas. Los ensayos por compresión se realizaron de acuerdo al procedimiento descrito en la Norma Venezolana Covenin 338:2002 [13].

El equipo que se utilizó para los ensayos para determinación de la resistencia a tracción por flexión en las vigas fue una Prensa Hidráulica con indicador de carga, marca *Baldwin*, Modelo *Universal* con una capacidad máxima de 30 toneladas. Para las vigas fabricadas con cada mezcla se determinó la resistencia a la flexión,

según la Norma Venezolana Covenin 342:1979 [15]. Se ensayaron por triplicado cilindros y vigas tanto para la mezcla patrón como para las mezclas reforzadas con fibra de bagazo de caña de azúcar con y sin tratamiento, para las proporciones volumétricas estudiadas y las distribuciones de tamaño corto, largo y tamaño aleatorio.

2.6. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza ANOVA, para determinar el efecto de las dosis o concentraciones de las fibras incluida. Para el análisis se empleó el software libre R-Plus.

3. Resultados y discusión

3.1. Resistencia a compresión para cilindros de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar, tamaño corto, a una concentración 2,5 % en volumen

En la Figura 1 se observa que para los cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar para un tamaño corto, sin tratamiento y a una concentración en volumen de 2,5 % como sustitución en parte del agregado fino, ensayados a los 7 días de curado, la resistencia se redujo a 8,72 MPa con respecto a los cilindros elaborados sin fibras mezcla patrón que proporcionaron una resistencia de 34,32 MPa y se aprecia en la Tabla 2, estando por encima la resistencia de los cilindro sin adición de fibras. Sin embargo, esta resistencia menor, es debido a que el exceso de agua absorbida genera un sustancial incremento de volumen en las fibras, asimismo, la degradación que sufren las fibras natural debida al ataque químico que le produce los elementos alcalinos contenidos en el cemento y las irregularidad del tamaño de las fibras. Al endurecer el concreto y secarse las fibras, éstas se contraen con la consiguiente pérdida de adherencia entre la fibra y la matriz, originando que la resistencia a flexión y tensión del concreto se vean afectadas.

Asimismo, en la Figura 2 se observa que en el caso de las fibras no tratadas con un agente protector debido a que presentan porosidad y por ser higroscópicas, el medio alcalino propio

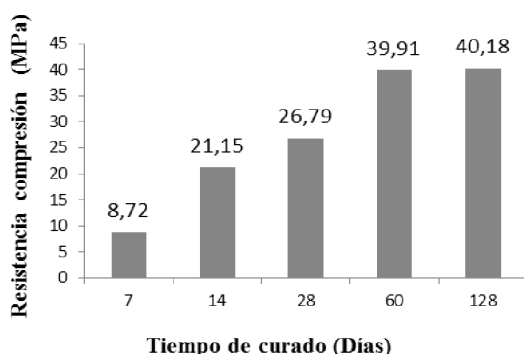


Figura 1: Ensayos resistencia a la compresión de cilindros reforzados con fibras de caña de azúcar con un porcentaje en volumen 2,5 % tamaño corto.

Tabla 2: Resultados de ensayos de la resistencia a la compresión de mezcla de concreto patrón [10].

	Tiempo de curado (días)				
	7	14	28	60	128
Resistencia a la compresión (MPa)	34,32	37,09	40,08	41,27	43,35

de la matriz de concreto afectó su función, comprometiendo su resistencia y durabilidad. Esto concuerda con lo acotado por Ramakrishna y Sundararajan [16] las fibras sin tratamiento químico, la alcalinidad del agua en los poros del concreto disuelve a la lignina y hemicelulosa y rompe los enlaces entre las microceldas por lo que las fibras se fragmentan perdiendo la capacidad de reforzar al concreto.

Así también, las microceldas se llenan de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y las fibras pierden su flexibilidad. De igual manera ya estas fibras fueron sometidas a un proceso mecánico previo para extraer el azúcar por lo que la durabilidad de la misma se ve comprometida sin un agente protector. No obstante, las fibras evitan el colapso del material en comparación al material sin refuerzo que falla de forma frágil al alcanzar la carga de ruptura.

Sin embargo, a partir de los 28 días la resistencia comenzó a elevarse observándose una tendencia similar a la mezcla patrón tal como se observa en la Tabla 2 a los 128 días de curado. Cabe considerar, por otra parte, que los valores de



Figura 2: Mezclas de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de tamaño corto presentando mala adherencia.

resistencia a compresión obtenidos cumplen con los valores estándares o comerciales para concretos de moderadas resistencias según lo expresado por Porrero *et al.* [17] los cuales se encuentran en un rango de 21 y 30 MPa para un tiempo de curado de 28 días.

Asimismo, Bilba *et al.* [18] enfatizan que el efecto de mezclar el bagazo entero crudo con el cemento comercial retrasa los tiempos de fraguado y disminuye la temperatura máxima de hidratación. Esto puede tener un gran interés por los materiales de construcción al ofrecer una buena temperatura, ya que el nuevo material se vuelve menos expansivo en la masa. Los principales compuestos botánicos que tienen un impacto negativo en el entorno son los azúcares solubles en agua, la hemicelulosa y la lignina.

3.2. Resistencia a compresión para cilindros de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar tamaño largo a una concentración 2,5 % en volumen

Se observa en la Figura 3 que los cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar para un tamaño largo sin tratamiento y una concentración en volumen de 2,5 % como sustitución en parte del agregado fino, ensayados a los 7 días de curado, arrojaron un valor de resistencia de 21,03 MPa, lo que se considera un resultado satisfactorio en comparación con la mezcla con adición de fibras tamaño corto sin tratamiento.

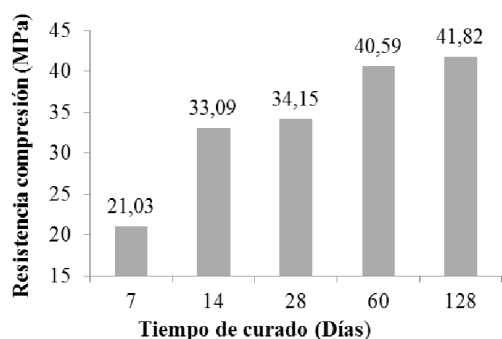


Figura 3: Ensayos resistencia a la compresión de cilindros reforzados con fibras de caña de azúcar con un porcentaje en volumen 2,5 % tamaño largo.

De igual manera a los 28 días de curado la resistencia aumentó, sin embargo, a los 128 días la resistencia comenzó a mostrar variaciones poco significativas con una tendencia similar a la mezcla patrón, mientras que la adherencia mejoró por tratarse de fibras largas lo que genera el incremento de la resistencia, en la Figura 4 se observa una mejor unión entre las fibras y la matriz cementicia si se compara con las fibras mostradas en la Figura 2 que son de tamaño corto y sin tratamiento.

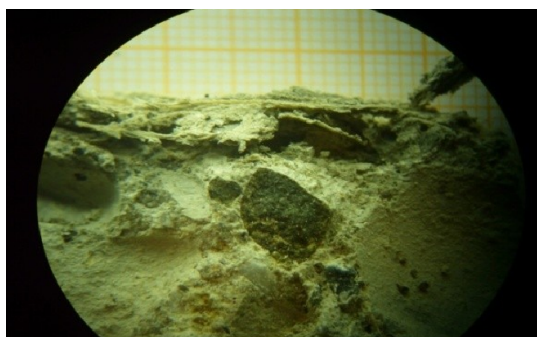


Figura 4: Mezclas de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña tamaño largo sin tratamiento presentando mejor adherencia.

3.3. Resistencia a compresión para cilindros de concreto reforzado con fibras tratadas tamaño aleatorio de bagazo de caña de azúcar a una concentración 2,5 % en volumen

En la Figura 5 se observa que para las mezclas reforzadas con fibras de bagazo de caña de azúcar tratada con Polimetilmetacrilato (PMMA)

a una concentración de 2,5 % en volumen, como sustitución en parte del agregado fino, la resistencia obtenida a los 7 días fue de 22,44 MPa siendo ligeramente superior si se compara con la obtenida para las mezclas reforzadas con fibras de tamaño largo sin tratamiento 21,03 MPa, esto es debido a que las fibras estaban recubiertas con PMMA que repele al agua protegiéndolas de la alcalinidad propia de la matriz cementante, además de incrementar la rugosidad de la superficie de la fibra que provoca un aumento en el anclaje mecánico.

Estos resultados concuerdan con Brown *et al.* [19] indicando que luego del tratamiento los microporos en la superficie de las fibras llegan a ser visibles y esto puede ocurrir debido a la lixiviación de la capa cerosa fuera de la cutícula, lo que aumenta la aspereza de la fibra, y facilita la unión mecánica en la interfase matriz concreto.

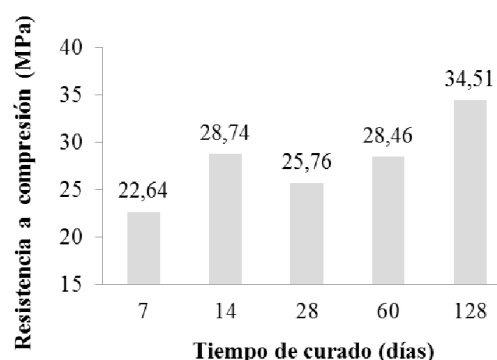


Figura 5: Ensayos resistencia a la compresión de cilindros reforzados con fibras de caña de azúcar con un porcentaje en volumen 2,5 % de fibra tratada y distribución aleatoria para un tamaño corto.

Sin embargo, a partir de los 28 días la resistencia es inferior si se compara con las mezclas reforzadas con fibras de bagazo de caña de azúcar tamaño largo, ya que la resistencia obtenida para los 28, 60 y 128 días fue de 34,51; 40,59; 41,82 MPa, respectivamente, mientras que para las mezclas de concreto con fibras tratadas fue de 29.76; 34.51; 40,1 MPa, para las mismas edades de ensayo, esto se debió a que los materiales compuestos con fibras tratadas contienen vacíos ya que la impregnación incompleta de las fibras con el PMMA, produjo puntos débiles en el material, lo cual no es favorable a alta concentración de esfuerzos que favorecen la

propagación de grietas originando la disminución de la resistencia tal como se aprecia en la Figura 6.



Figura 6: Impregnación incompleta de las fibras de bagazo de caña de azúcar con el PMMA.

Los resultados obtenidos en esta investigación concuerdan con Osorio et al. [1]. Se observó además, que la adherencia de las fibras a la matriz del concreto era aceptable en aquellos perímetros, donde las fibras son uniformes, sin embargo, se presentan esparcimiento entre la fibra y la matriz de concreto, debido a la ausencia de áridos finos, a la irregularidad de la longitud y posiblemente a la degradación que sufre la fibra natural, debido al ataque químico que le producen los elementos alcalinos contenidos en el cemento pese al tratamiento realizado; lo anterior puede generar una menor resistencia en el concreto fibroreforzado, debido a que estos espacios disminuyen la compacidad en el concreto.

3.4. Resistencia a compresión para todos los cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar tamaño corto, largo y aleatorio con y sin tratamiento a una concentración 2,5 % en volumen

Los resultados obtenidos al ensayar los cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar como sustitución parcial del agregado fino, para todas las edades y su relación con el tamaño, con y sin tratamiento, son mostrados en la Figura 7 en la cual se observa una disminución de la resistencia para todos los tamaños cortos y largos para fibras sin tratamiento y tamaño aleatorio para fibras tratadas, al compararse con la mezcla patrón sin fibras.

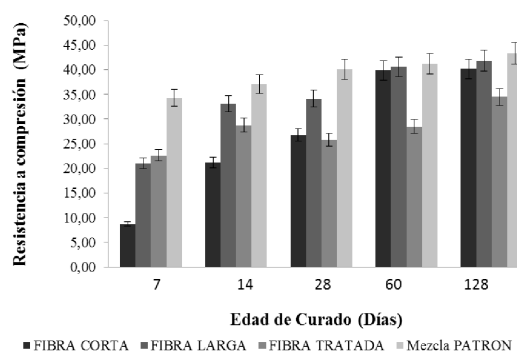


Figura 7: Ensayos resistencia a la compresión de cilindros reforzados con fibras de caña de azúcar con un porcentaje en volumen 2,5 % de fibras con y sin tratamiento de distinto tamaño.

Sin embargo, al cabo de los 128 días de curado los resultados muestran una resistencia similar por lo que, las mezclas con fibras de bagazo de caña de azúcar pueden ser recomendadas para su uso en construcción. No obstante, a edades tempranas la resistencia se ve comprometida.

Nótese que a los 60 días de curado la resistencia obtenida para la mezcla sin fibra denominada mezcla patrón iguala la resistencia a compresión de la mezcla con fibra corta (40,11 MPa.)

Estos resultados concuerdan con Osorio *et al.* [1] al señalar que las fibras de bagazo de caña utilizada en la elaboración del concreto reforzado para ser evaluadas a compresión, le imparten propiedades mecánicas importantes al compuesto, principalmente las probetas con adiciones de fibras entre el 0,5 y 2,5 % en relación al peso total del agregado grueso, y cuyas fibras tengan longitudes entre 15 y 25 mm retenidas en el tamiz N°6, las cuales alcanzan valores de resistencia a compresión a los 14 días de fraguado entre 8,6 y 16,88 MPa., estando por encima de los cilindros sin adición de fibras, es decir, la mezcla patrón.

De igual forma Olutoge *et al.* [20], en su investigación afirman que los resultados muestran que el concreto simple (0 % en volumen de fibra) tenía la mayor resistencia a la compresión de 22,32 MPa a los 7 días, 26,82 MPa a los 14 días, 31,12 a los 21 días y 36,20 a los 28 días. Esto implica que las resistencias a la compresión del hormigón aumentan a medida que aumenta el número de

días. Además, cuanto más aumenta el volumen de fibra en el hormigón, menor es la resistencia a la compresión del hormigón. Hubo una gran reducción en la resistencia a la compresión del concreto cuando el volumen de fibra de bagazo de la caña de azúcar aumentó de 0 % a 0,5 % y también una resistencia considerable en el concreto al aumentar el volumen de fibra a 0,75 %; 1,0 % y 1,25 %. Esto sugiere que el aumento en el volumen de las fibras de bagazo de caña de azúcar en el concreto tiene poco efecto sobre la resistencia a la compresión del concreto.

El uso de fibras orgánicas provenientes de bagazo de caña de azúcar, podría satisfacer la necesidad de encontrar y aplicar materiales de construcción con tecnologías sustentables. Es cierto que con el uso de estas fibras la resistencia disminuye un poco cuando se compara con la mezcla control o patrón sin fibras, pero todo dependerá de las exigencias del material a preparar. El uso de ellas permitirá construir materiales más flexibles disminuyendo la presencia de microfisuras y macrofisuras y desde el punto de vista ambientalista se le brinda un valor agregado a un desecho.

3.5. *Peso de los cilindros saturados con superficie seca*

En la Figura 8 se observa que la pérdida de peso de los cilindros de concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar fue máxima en aquellas que estuvieron tratadas y secadas en horno a 100 °C, debido a que con el secado se elimina mayor cantidad de agua y con el tratamiento alcalino se diluyó parte de los componentes de las fibras, lo cual fue observado cuando fueron sometidas al proceso de acetilación en donde el agua de lavado tomó una coloración bastante marrón eliminando ceras e impurezas naturales y artificiales.

También, se observa que el peso de los cilindros con fibras tratadas es menor en comparación con las fibras no tratadas, debido a que se incrementa el área superficial eficaz disponible y disminuye el peso de las fibras.

La tenacidad es la energía total absorbida para romper un espécimen de concreto a la flexión. Esta propiedad se ha visto incrementada con la adición de fibras ya que en las zonas de microgrietas al

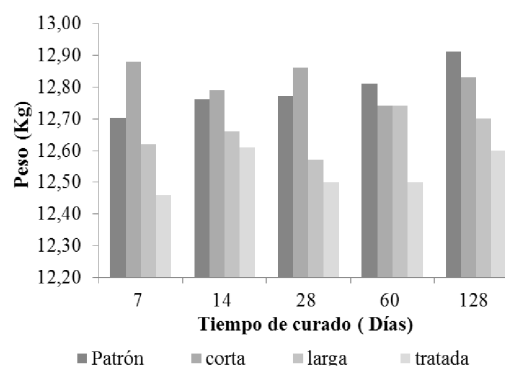


Figura 8: Peso de los cilindros reforzados con bagazo de caña de azúcar.

momento de aplicar una carga las fibras evitan que se rompa o disgregue el material. Las fibras de bagazo de caña de azúcar lograron mantener unidos los cilindros y vigas, por lo que le aportaron durabilidad a las mezclas de concreto provocando ventajosamente la disminución de las fisuras tanto en estado fresco como endurecido. En la Figura 9 se observan cilindros ensayados a los cuales se les determinó la resistencia a compresión mostrando comportamiento similar a los que experimentó la mezcla patrón, soportando la carga sin llegar a la fractura.



Figura 9: Concreto reforzado con fibras experimentando buena tenacidad.

3.6. *Análisis estadístico para cilindros reforzados con fibras de bagazo de caña de azúcar*

Para las fibras de caña de azúcar se consideró solo la concentración en volumen 2,5 % como sustitución en parte del agregado fino, se analizó el efecto del tamaño de la fibra respecto a la

mezcla patrón que no contiene fibras. En este caso se observó que las fibras de bagazo de caña de azúcar no se adhieren fácilmente a la mezcla requiriendo más tiempo para que ocurra este proceso, de acuerdo al análisis de varianza se obtuvo que a partir de los 28 días de curado es que se obtiene una mezcla parecida a la mezcla patrón, encontrándose que a una concentración en volumen de 2,5 % tamaño largo produce una alta resistencia, sin embargo, al transcurrir los días de curado las mismas comienzan a perder resistencia y dejan de comportarse como la mezcla patrón.

3.7. Estudio de las Vigas reforzadas con las fibras de bagazo de caña de azúcar a una concentración en volumen 2,5 %

El concreto es un material frágil y de baja resistencia a flexo tracción, debido a su falta de capacidad para soportar deformaciones, en este sentido se analizó la resistencia a la flexión de las vigas cuando son preparadas con mezclas reforzadas con fibras de bagazo de caña de azúcar como sustitución en parte del agregado fino.

En cuanto a los valores de la resistencia de vigas reforzadas y su relación con el tamaño, con y sin tratamiento realizado a las fibras, son mostrados en la Figura 10 donde se observó una disminución en el módulo de ruptura para todo los tamaños corto, largo y aleatorio de fibras con y sin tratamiento al compararse con la mezcla patrón. La resistencia más baja obtenida fue 2,38 MPa para las mezclas reforzadas con fibras tamaño largo sin tratamiento al compararse con la mezcla patrón, cuya resistencia fue 4,63 MPa, esto se debió a que las vigas reforzadas presentaron falta de capacidad para soportar deformaciones.

Esto implica que hubo una deficiente adherencia en algunos sitios de la viga existiendo puntos débiles entre las fibras y la matriz cementante, además, como no estaban tratadas químicamente mediante el proceso de acetilación y recubierta con PMMA, es posible que la absorción de humedad de las fibras haya perjudicado los valores tan bajos de resistencia a flexión. Estos resultados concuerdan con Águila y Sosa, [21] quienes usaron cenizas de caña de azúcar y las muestras contentivas de ceniza de bagazo de caña no mostraron posibilidades

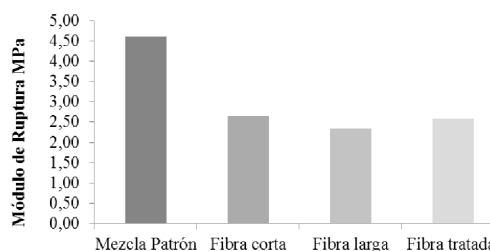


Figura 10: Resistencia de vigas reforzadas con las fibras de bagazo de caña de azúcar medida a los 28 días de curado.

de ser empleadas como material puzolánico, sin embargo, en el análisis de su composición química se pudo apreciar que se presentaron en el material altos contenidos de humedad con un 10,72 % lo que pudo afectar la resistencia.

A pesar de que no se obtuvieron buenos resultados en el módulo de ruptura al compararse con la mezcla patrón, y las propiedades mecánicas se vieron comprometidas, en la inspección visual se logró ver que la adición de fibras al concreto disminuyó el agrietamiento del concreto en su estado endurecido y cuando el espécimen fue ensayado éste permaneció unido, no hubo desprendimiento ni disgregación, debido a que las fibras sirvieron como unión entre las partes y le proporcionó a la viga mayor flexibilidad.

Es de mucha importancia acotar que las fibras contenidas en las vigas, controlan las microfisuras que se pueden originar durante las primeras 24 horas y detienen su desarrollo a macrofisuras, evitando, que la estructura donde es usada este tipo de mezcla colapse, permitiendo además que la mezcla de concreto desarrolle su mejor forma en cuanto a sus características.

Si se compara con las mezclas reforzadas con fibras de coco [9] estas presentaron una menor velocidad de evaporación de agua lo que reduce aún más la posibilidad de fisuramiento. Tanto en estado fresco como en estado endurecido, el concreto es susceptible a fisurarse; es por ello que si llegase a presentarse un patrón de fisuración dado, se espera que la estructura continúe funcionando y que el ancho de la fisura sea controlado y que no crezca, es decir, las fibras limitan el crecimiento del ancho

de la fisura.

En contraste con Olutoge *et al.* [20], muestran en su investigación que el concreto simple 0% volumen de fibras de bagazo de caña de azúcar tiene las resistencias a la flexión más altas de 2,24 MPa a los 7 días, 2,48 MPa a los 14 días, 3,14 a los 21 días y 3,15 a los 28 días. Esto implica que las resistencias a la flexión del concreto aumentan a medida que aumenta el número de días, la resistencia a la flexión disminuye con el volumen de fibras en el concreto. Es decir, cuanto mayor sea el volumen de fibras en el concreto, menor será la resistencia a la flexión del concreto.

3.8. Análisis estadístico de las vigas reforzadas con fibras de bagazo de caña de azúcar

Se verificó el cumplimiento de los supuestos del ANOVA, y se pudo determinar el efecto de las fibras sobre las vigas tomando como referencia una mezcla denominada blanco, encontrándose que la mayoría de las mezclas a las cuales se adicionó fibras de caña se alejaron de la mezcla patrón

4. Conclusiones

Los concretos reforzados con fibras naturales con bagazo de caña de azúcar tienen el potencial para ser usados como materiales de construcción económicos, ya que su tendencia a medida que transcurre el tiempo de curado es similar a las mezclas elaboradas de manera tradicional. Las fibras naturales son materiales que actúan como un alternativa tecnológica para un amplio rango de aplicaciones donde sea requerida la detección y el monitoreo de fisuramiento. El concreto fibroreforzado le permite a la estructura, después de la fisuración, continuar “absorbiendo” carga sin colapsar y continuar funcionando. De allí la importancia de reforzar los concretos con fibras aportándole características específicas y ventajosas para los distintos ramos de la construcción.

La selección de una u otra fibra natural como material de refuerzo va a depender de las propiedades finales de diseño seleccionadas. En función de la dosificación, de las longitudes de fibras y de las propiedades de las mismas se confiere al concreto propiedades distintas, de esta

manera se acentúan más unas propiedades sobre otras en función de los distintos usos y aplicaciones del concreto reforzado con fibras.

El proceso de impregnación de las fibras de bagazo de caña de azúcar con PMMA no fue un método eficaz, por lo tanto falló la unión entre fibras, polímero y matriz cementante. Estas no se recubrieron en su totalidad dejando puntos sin protección y expuestas a la absorción de humedad y del ataque alcalino propio de las mezclas de concreto, lo que permitió obtener propiedades mecánicas muy bajas a edades temprana de curado en comparación con fibras sin tratamiento. Para futuras investigaciones es recomendable el uso de un agente acoplante para mejorar la interfase entre las fibras y el polímero y mejorar resistencia del concreto fibroreforzado.

5. Referencias

- [1] J. Osorio, F. Varón y J. Herrera. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. *DYNA*, 74(153), 2007.
- [2] F. Sheikh, H. Herman, and N. Azmi. Properties of sugarcane fiber on the strength of the normal and lightweight concrete. In *MATEC Web of Conferences*, volume 103. EDP Sciences, 2017.
- [3] S. Quintero y L. González. Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 20:134–150, 2011.
- [4] A. Silva. Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. Título de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2002.
- [5] A. Vijay and S. Arivalagan. Engineering properties on the sugar cane bagasse with sisal fibre reinforced concrete. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(24):15142–15146, 2017.
- [6] A. Sudhakar and A. Babu. Investigation of effect on various fibres on the mechanical properties of bagasse ash blended with high performance concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(6):1756–1759, 2017.
- [7] C. Juárez, P. Rodríguez, R. Rivera y M. Rechy. Uso de las fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en el concreto. *Ciencia UANL*, 6(4):465–476, 2003.
- [8] Y. Cao, S. Shibata, and I. Fukumoto. Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. *Composites part A: Applied science and Manufacturing*, 37(3):423–429, 2006.

- [9] B. Paricaguán. *Contribución al estudio del comportamiento mecánico y fisicoquímico del concreto reforzado con fibras naturales de coco y bagazo de caña de azúcar para su uso en construcción*. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela, 2015.
- [10] B. Paricaguán, C. Albano, R. Torres, N. Camacho, J. Infante, and J. Muñoz. Effect of the coconut fibers on the flexural strength of concrete mixtures. *DYNA*, 88(4):424–432, 2013.
- [11] COVENIN. COVENIN 344:2002, Concreto fresco. Toma de muestras. (1^{ra} Revisión). COVENIN, 2002.
- [12] COVENIN. COVENIN 339:2003, Concreto. Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams. (2^{da} revisión). COVENIN, 2003.
- [13] COVENIN. COVENIN 338:2002, Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto. (2^{da} revisión). COVENIN, 2002.
- [14] COVENIN. COVENIN 340:2004, Concreto. Elaboración y curado de probetas en el laboratorio para ensayos a flexión. COVENIN, 2004.
- [15] COVENIN. COVENIN 342:1979, Método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción por flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo. COVENIN, 1979.
- [16] G. Ramakrishna and T. Sundararajan. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 27(5):575 – 582, 2005.
- [17] J. Porrero, C. Ramos, J. Grases y Velazco G. *Manual del Concreto Estructural*. SIDETUR, Caracas, Venezuela, 2008.
- [18] K. Bilba, M. Arsène, and A. Ouensanga. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement and Concrete Composites*, 25(1):91–96, 2003.
- [19] A. Brown, L. Matellanes, A. Delgado, E. Momeñe, J. Txarroalde, M. Serantes, J. Leal y A. Renté. Disminución del empleo de materiales plásticos a partir de la revalorización del bagazo cubano. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 8(4):287–299, 2007.
- [20] F. Olutoge, O. Ofuyatan, A. Rachael y E. Opaluwa. Strength characteristics of concrete reinforced with sugarcane bagasse fiber. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(3):68–71, 2015.
- [21] I. Águila y M. Sosa. Evaluación físico químico de cenizas de cascarilla de arroz, bagazo de caña y hoja de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 23(4):55–66, 2008.