

Estudio experimental en morteros con ceniza de hoja de bambú como material cementante suplementario

Experimental study on mortars with bamboo leaf ash as supplementary cementitious material

Ana V. Jaramillo B.¹ , Carlos M. González C.¹ , Nehemías G. Lopez H.¹ , Ka Lai N. Ng Puga^{1,2,*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

²Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Experimental de Ingeniería, Laboratorio de Ensayo de Materiales, Panamá

Fecha de recepción: 7 de marzo de 2023. **Fecha de aceptación:** 15 de junio de 2023.

***Autor de correspondencia:** kalai.ng@utp.ac.pa

Resumen. Dentro de los materiales de construcción que poseen tendencia a mostrar alzas significativas en sus precios debido a agentes variables se encuentra el cemento, siendo este un material de construcción imprescindible en la región. Este artículo estudia la factibilidad de una propuesta de reemplazo del porcentaje de material cementante en morteros de cemento hidráulico por un elemento de menor costo e impacto ambiental, cenizas de hojas de bambú (CHB), del cual varios autores indican que poseen propiedades puzolánicas considerables. Se presenta el procedimiento completo para la obtención de este material suplementario, que va desde la recolección de las hojas de bambú, su secado, triturado e incineración para la obtención de las cenizas. El estudio pretende justificar el uso de las cenizas de hojas de bambú en morteros a través del análisis de los resultados de ensayos de resistencia a la compresión, con el fin de evaluar su resistencia. Durante este estudio se obtuvieron resultados prometedores en los ensayos de resistencia a la compresión de los morteros que incorporan CHB, tanto a edades de ensayo tempranas (24 horas, 3 días y 7 días), como a edades avanzadas de ensayo de 28 días y 56 días, en los cuales las resistencias a compresión de los morteros con CHB fueron superiores o muy similares a las resistencias de los morteros control, teniendo estos resultados implicaciones importantes en el desarrollo de nuevos materiales sostenibles con potencial futuro a implementarse en la industria del concreto.

Palabras clave. cenizas, hojas de bambú, material cementante suplementario, mortero, puzolana, resistencia a la compresión.

Abstract One of the construction materials that tend to show significant price increases due to variable agents is cement, which is an essential construction material in the region. This article studies the feasibility of a proposal to replace the percentage of cementitious material in hydraulic cement mortars with one of lower cost and environmental impact, bamboo leaf ash (CHB, for its initials in Spanish), which various authors have indicated that it has considerably pozzolanic properties. The complete procedure for obtaining this supplementary material is presented, ranging from the collection of the bamboo leaves themselves to their drying, crushing and incineration to obtain the ashes. The study aims to justify the use of bamboo leaf ash in mortars through the analysis of compressive strength test results to evaluate its resistance. During this study, promising results were obtained in the compressive strength tests of mortars that incorporate CHB, both at early testing ages (24 hours, 3 and 7 days), and at advanced testing ages (28 and 56 days), for which the CHB mortars compressive strengths were superior or very similar compared with the control mortars' compressive strengths, having these results important implications in the development of new sustainable materials with future potential to be implemented in the concrete industry.

Keywords ash, bamboo leaves, supplementary cementitious material, mortar, pozzolana, compressive strength,

1. Introducción

El enfoque de este estudio versa sobre la problemática ambiental y económica que enmarca la industria de producción de cemento. Actualmente la producción de cemento es el más grande emisor industrial de dióxido de carbono en el mundo, con cerca del 8 % o 2.7 billones de toneladas por año. Esto en gran parte por la combustión requerida de carbón para alcanzar temperaturas de 1000°C [1]. La producción de cemento demanda una gran cantidad de energía, por lo que su huella ambiental es aún mayor [2].

La industria de la construcción explora alternativas que permitan reducir costos y aumentar las propiedades del material cementante. Por lo cual, el utilizar materiales innovadores y cementos mezclados, diseñados en concordancia con aspectos fundamentales de la ciencia de materiales, permitiría el diseño de sistemas estructurales más eficientes [3]. Teniendo en cuenta esta necesidad global por prácticas industriales más sostenibles, y la optimización de recursos que demanda el sector de la construcción, este estudio propone la utilización de cenizas de hojas de bambú (CHB), como material suplementario parcial del cemento en el diseño de mezclas de morteros hidráulicos.

La utilización de CHB, se justifica por la gran cantidad de material de desecho generado por las actividades antropogénicas relacionadas con la utilización del bambú como materia prima, lo que hace de las hojas un material accesible y económico. De igual manera las propiedades de puzolana que tienen las hojas del bambú favorecen a su utilización como cementante [4], una vez aplicado el correcto proceso de calcinación, lo que expone su materia inorgánica.

La utilización de cementos mezclados o con adiciones, ha sido aplicado ampliamente ya que mejora las propiedades de este, en estado fresco y endurecido, a su vez aportan a la durabilidad, trabajabilidad y resistencia [2].

Con respecto al uso de cenizas como material cementante, se conoce que las puzolanas naturales, son materiales que al utilizarse con el cemento portland, contribuyen a la mejora de las propiedades mecánicas del concreto o morteros [5].

Desde la década de los 70 se viene utilizando los materiales cementantes suplementarios en el concreto. Se los puede utilizar como adición o como sustitución parcial del cemento portland, dependiendo de las propiedades de los materiales y de los efectos esperados en el concreto.

También hay que considerar que los materiales suplementarios reaccionan diferente dependiendo del tipo de cemento que se use. Normalmente para la adición o reemplazo por material suplementario se hace con cemento tipo I y III ya que los tipos II, IV y V suelen contar con adiciones las cuales aumentan sus propiedades de resistencia a la compresión [6]. Del mismo modo estos tipos de cemento se relacionan con los que identifica la norma ASTM C1157 según sus aplicaciones [5], siendo los de tipo GU (Uso general) y HE

(Alta resistencia inicial) aquellos que por lo general son utilizados cuando se planea utilizar un material cementante suplementario.

1.1 Puzolanas naturales

El uso de la ceniza volcánica y de la arcilla calcinada en otras culturas data de 2000 a.C. Muchas de las estructuras romanas, griegas, indianas y egipcias, producidas con concreto de puzolana, se pueden visitar hoy en día, comprobando la durabilidad de estos materiales [5].

Las puzolanas naturales comúnmente empleadas hoy en día son los materiales procesados, estos van desde esquistos calcinados, metacaolinita y arcillas calcinadas.

1.2 Cenizas de material orgánico

En el año 2007, la Universidad de Obafemi Awolowo (Nigeria) se discutió que el cemento compuesto por material ecológico se puede obtener mediante el reemplazo parcial del cemento Portland con ciertos materiales de bajo costo. Estudiaron la hidratación de la CHB mezclada en el cemento Portland. Se concluyó que la CHB es un material puzolánico eficaz. Cuando se mezcló el 20 % en peso de CHB con cemento Portland, se encontró que los valores de resistencia a la compresión de los morteros a los 28 días de hidratación eran bastante comparables con los morteros sin porcentaje de sustitución [4].

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

- Cenizas de hojas de bambú.
- Cemento tipo GU.
- Arena graduada estándar (Ottawa), arena de sílice natural.
- Agua potable.

2.2 Métodos

2.2.1 Metodología para la obtención de las cenizas

- Recolección de hojas

Las hojas de bambú fueron recolectadas secas, procedentes de un espécimen de bambú de alrededor de 2.5 años de edad, ubicado en el área de Los Pinos, Caimitillo, Panamá (Figura 1). Se ha distinguido el tipo de especie de bambú como *Bambusa vulgaris* (Schrad. ex J.C. Wendl), el cual es una especie introducida y cultivada en Panamá conocida comúnmente como bambú amarillo [7].



Figura 1. Hoja de bambú proveniente del espécimen utilizado.

- Secado en horno

El proceso para la obtención de CHB requería que estas fueran previamente tratadas en un horno de secado. Las hojas se introdujeron en un horno de secado, utilizando bandejas de aluminio, a una temperatura de 160°C durante dos horas (Figura 2).



Figura 2. Hojas de bambú en el horno de secado.

- Triturado

Posterior al proceso en el horno de secado, las hojas completamente secas fueron trituradas con el fin de disminuir el volumen que ocupaban (Figura 3). Este proceso se realizó completamente a mano, con la ayuda de una barra de acero y un recipiente del mismo material.



Figura 3. Hojas secadas al horno luego del triturado.

- Obtención de cenizas

Para la obtención de CHB, se empleó una mufla. Debido a que la capacidad de la mufla representó una limitante, el proceso se realizó en dos rondas. En la primera ronda se

quemaron 97.57 gramos de hojas secas trituradas mientras que en la segunda ronda se quemaron 162.56 gramos.

Siendo el mismo procedimiento para ambas rondas, las hojas de bambú secas y trituradas se pesaron mediante una balanza calibrada. El material fue introducido en la mufla en crisoles, se precalentó la mufla a 100°C hasta alcanzar una temperatura de 600°C para luego permanecer dentro por dos horas para su incineración [8].

En la primera ronda se obtuvieron un total de 29.50 gramos de CHB, en la segunda ronda se obtuvieron 52.34 gramos. El porcentaje de pérdida de material a través de su transformación de seco y triturado a cenizas fue aproximadamente del 70 % del material introducido en la mufla.

Se notó que, en los crisoles de mayor profundidad, las cenizas del fondo estaban negras, mientras que la parte superior eran blancas, tal como se aprecia en la Figura 4. Esto indica la posible necesidad de una temperatura de incineración mayor para que la coloración de las cenizas fuese homogénea.



Figura 4. Cenizas de hojas de bambú.

2.2.2 Diseño de morteros

Debido a la limitante en la obtención de las cenizas, se utilizó la cantidad obtenida en la primera ronda como primer reemplazo, siendo este un 2.8 %. El reemplazo que se realizó con la cantidad de ceniza obtenida en la segunda ronda fue de 5 %. El primer diseño de mortero corresponde entonces al patrón, es decir, al mortero sin reemplazo.

La dosificación empleada para estos morteros se basa en la norma ASTM C109 para doce cubos de mortero [9] y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseño de morteros para los tres porcentajes de reemplazo

Reemplazo	0%	2,8%	5%
Cemento (g)	1060.00	1030.50	1007.66
Ceniza (g)	0.00	29.50	52.34
Arena (g)	2915.00	2915.00	2915.00
Agua (ml)	514.00	514.00	526.00

2.2.3 Mezclado

El mezclado fue realizado en una mezcladora de laboratorio digital, según lo estipula la designación ASTM C305 “Práctica para Mezclado Mecánico de Pastas de Cemento Hidráulico y Morteros de Consistencia Plástica”.

2.2.4 Medición de flujo

La medición del flujo de los tres diseños de mortero se realizó siguiendo la norma ASTM C1437-15. Este método de prueba está destinado a ser utilizado para determinar el flujo de morteros de cemento hidráulico, y de morteros que contienen materiales cementosos que no sean cementos hidráulicos [10].

En la Figura 5 se ilustra el flujo de los morteros, el cual se realizó con el objetivo de analizar la variación de flujo en las dosificaciones que incluyen CHB.



Figura 5. Flujo de los morteros, de izquierda a derecha 0 %, 2,8 % y 5 % de reemplazo.

2.2.5 Moldeado

Se procedió a rellenar los moldes para cubos de morteros, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C109. Se realizaron un total de 36 cubos, 12 cubos para las muestras con 0 % de reemplazo, otros 12 cubos para la mezcla de 2.8 % de reemplazo y 12 cubos más para la mezcla con 5 % de reemplazo.

2.2.6 Curado

Los moldes con los cubos de morteros se introdujeron en una cámara de curado por 24 horas. Luego, se sumergieron en una tina de curado que contiene agua saturada con cal en un espacio con una temperatura controlada de 21°C a 23°C, a excepción de los cubos a ensayar a las 24 horas de curado. El resto de los cubos permanecen sumergidos en la tina de curado hasta ser sometidos a ensayo de compresión a las edades correspondientes.

2.2.7 Prueba de resistencia a la compresión

Para este ensayo se ha empleado una máquina de ensayo a compresión FORNEY Serie 250 (Figura 6).



Figura 6. Muestra previa al ensayo de resistencia a la compresión.

La programación de los ensayos se muestra en la tabla 2. Los cubos fueron marcados con una codificación única para cada uno, y fueron asignados aleatoriamente para cada edad de ensayo.

Tabla 2. Programación de ensayos

Edad del ensayo (días)	Porcentaje de reemplazo		
	0 %	2.8 %	5 %
1	C008	2010	506
	C011	204	507
	C006	2012	503
3	C004	206	504
	C005	207	501
	C009	209	5010
7	C001	205	502
	C010	201	508
28	C002	202	505
	C007	208	509
56	C003	203	5012
	C012	2011	5011

2.2.8 Análisis químico

Dentro de los ensayos químicos que se realizaron en este estudio están la determinación del pH de las cenizas disueltas en agua destilada mediante el equipo HQ40d Portable Meter Hach. La preparación de la muestra consistió en triturar 3 gramos de cenizas utilizando un mortero de Agatha (Figura 7), las cuales luego se mezclaron en un vaso químico con 150 ml de agua destilada utilizando un plato agitador magnético a 400 rpm durante una hora, a la solución se le filtraron las cenizas, para medirle el pH y conductividad de los elementos de las cenizas disueltos en el agua destilada (Figura 8).

Otro análisis realizado fue la determinación de los elementos que componen las cenizas obtenidas, esto fue realizado a través de un espectrómetro Bruker S2 PicofoxTXRF de análisis de elementos de traza, lo que ayudaría a comprender de mejor manera que elementos de las cenizas están contribuyendo o contrarrestando el desarrollo de la resistencia a compresión a largo plazo de los morteros.



Figura 7. Cenizas trituradas en mortero de Agatha.



Figura 8. Cenizas en agitación por una hora (izquierda). Medición de pH y conductividad (derecha).

3. Resultados y discusión

3.1 Ensayo de flujo

Los resultados para el ensayo de flujo, como se presentan en la Tabla 3, indican que, a mayor porcentaje de reemplazo, hay una disminución en los diámetros obtenidos. Lo que permite inferir, que la absorción de agua en las cenizas es un factor a consideración, ya que puede afectar la trabajabilidad de los morteros. Cabe señalar, como se ve en la Tabla 1, para la dosificación del mortero con 5 % de reemplazo se tuvo que adicionar 12 ml de agua para lograr una mejor trabajabilidad con el mortero puesto que se veía seco una vez mezclado; aun así, se obtuvo un % de fluidez menor que con los otros dos morteros. Esta adición de agua pudo afectar la resistencia de los cubos de morteros con 5 % de reemplazo toda vez que la relación agua-cemento sería mayor para este mortero comparado con los otros dos morteros a los cuales no se les agregó agua adicional para mejorar su flujo. El % de fluidez se calculó con la ecuación (1).

$$\% \text{ Fluidez} = \frac{\phi_{prom} - A}{A} \times 100 \quad (1)$$

A: Diámetro interno de la base del molde de flujo en mm

Tabla 2. Flujo de los morteros fabricados

Diámetros (mm)	Porcentaje de reemplazo		
	0 %	2.8 %	5.0 %
Ø1	200	170	100
Ø2	200	160	120
Ø3	190	170	110
Ø4	190	170	110
Ø Promedio	195	167.5	110
% de Fluidez	98.07	70.14	11.73

3.2 Resistencia a la compresión

Las muestras ensayadas de mortero presentan una falla típica, en la cual se efectúan fisuras prácticamente verticales, en los lados del cubo, y disminuyen hacia el centro de este, como se ilustra en la Figura 9, esto es característico de una falla por cortante [11].



Figura 9. Izquierda - Cubos de control ensayados a los 7 días, presentan falla por corte. Derecha - Cubos ensayados a los 3 días de curado con falla típica de reloj de arena.

Los resultados mostrados en la Figura 10 son del ensayo de resistencia a la compresión donde se visualiza la relación existente entre la resistencia obtenida según el porcentaje de reemplazo de material cementante por CHB, ensayos realizados a las edades 1 día, 3 días, 7 días, 28 días y 56 días. Los colores representan los diferentes porcentajes de reemplazo utilizados.

Se evidencia que la resistencia a la compresión aumenta con el tiempo de curado, y que las muestras con reemplazo de cemento por CHB, alcanzan resistencias tempranas comparables con la muestra de control. En la Figura 10, claramente se aprecia que, en el ensayo a los 7 días de curado, los cubos con 2.8 % de CHB, superan en resistencia promedio a los cubos de control, lo cual es un resultado prometedor, para el desarrollo de este estudio.

Para obtener una mejor comprensión de las variables estudiadas e información experimental de calidad, sobre el reemplazo de material cementante por CHB, se planificó la realización de ensayos de resistencia a la compresión para edades de curado mayores, con la finalidad de llegar a mejores conclusiones.

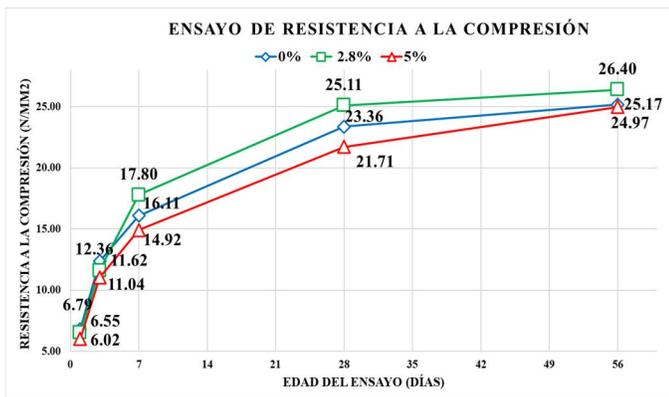


Figura 10. Resistencia a compresión, sin reemplazo de CHB y con reemplazo de 2.8 % y 5 %.

Se realizaron ensayos para las edades de 28 días y 56 días, esto considerando que algunos cementos mezclados con puzolanas naturales alcanzan su resistencia máxima entre los 28 días a 90 días, periodo donde incluso pueden superar la

resistencia de control, dependiendo de las proporciones de la mezcla [5].

Ciertamente se logra confirmar este supuesto, teniendo presente que a partir del séptimo día de curado la tendencia en el incremento de la resistencia se mantuvo para las muestras, no obstante, para la muestra con 5 % de CHB, siendo este el resultado más llamativo que emerge de los datos, considerando que, inclusive frente a la incorporación de 12 ml de agua adicionales a lo contemplado en la dosificación, lo cual elevó su relación agua cemento, estas muestras manifiestan una resistencia comparable con las de control a los 56 días de curado en el ensayo realizado, lo cual refleja una relación positiva entre el incremento de resistencia a la compresión con edades de curado avanzadas para morteros que incorporan cenizas de hojas de bambú como material cementante suplementario.

3.3 Análisis químico

El pH medido en la solución de las cenizas en agua destilada fue de un pH 9.83, lo que indica que la solución es alcalina o básica, lo que es bueno para los morteros, pues un ambiente alcalino es deseable. En tanto que la conductividad de los sólidos disueltos en el agua destilada arrojó un valor de 216.7 mg/L.

En cuanto a los elementos detectados en el análisis de espectrometría, la Tabla 3 muestra los elementos en mayor proporción para las muestras ensayadas, en donde M1 es la muestra de agua destilada con las cenizas filtradas, que se utilizaron para la determinación del pH y M2 es la muestra de agua con las cenizas sin filtrar digeridas por 1 hora en un digestor de microondas.

Tabla 3. Elementos encontrados en las cenizas de bambú

Muestra	Elementos predominantes (de mayor a menor concentración)
M1	Ca, K
M2	Fe, Ca, Zn, K, Ti, Mn

Estos resultados indican que el elemento que está teniendo mayor interacción con el desarrollo de la resistencia a compresión de los morteros es la presencia de calcio en las cenizas. No se detectó presencia de sílice lo que nos puede indicar que, contrario a lo que algunos autores indican que las cenizas de hojas de bambú tienen propiedades puzolánicas, estas cenizas más bien promueven una reacción hidráulica en lugar de promover una reacción puzolánica debido a la presencia del calcio.

4. Conclusiones

- Las cenizas de hojas de bambú contienen propiedades que la hacen un material suplementario apropiado para el cementante en morteros hidráulicos.

- El implementar las CHB como material cementante suplementario, disminuiría los efectos ambientales negativos que tiene la producción del cemento.
- Un mayor porcentaje de reemplazo por cenizas afecta el flujo de los morteros, por consecuente se requiere ajustar el agua para conseguir una mejor fluidez, pero esta adición de agua afectará la relación agua-cemento del mortero, lo que incide directamente en la resistencia a compresión del mortero.
- La resistencia a la compresión obtenida con cada porcentaje de reemplazo ensayado sustenta la viabilidad de la propuesta de este estudio.
- Se justifica la utilización de CHB, como un material accesible, eficaz y sostenible para ser suplementario del cemento.
- Con los ensayos realizados en este estudio se ha encontrado evidencia muy positiva de que las cenizas de hojas de bambú aportan a los morteros un incremento en la resistencia a la compresión, pese a que las mismas generan una mayor absorción de agua, como es el caso de las muestras con 5 % de CHB, ya que estas requirieron 12 ml de agua adicionales a lo estipulado en el diseño de mezcla, aumentando su relación agua cemento, y no obstante, su resistencia alcanzó valores comparables con la muestra de control, a edades de ensayo avanzadas.
- Una limitación ha sido la cantidad de ceniza producida, ya que el porcentaje de biomasa que efectivamente se transforma a ceniza es del 30 %.
- El pH de la solución de agua con cenizas filtradas es alcalino, que es un ambiente ideal para los morteros; en tanto que el elemento predominante presente en las dos muestras analizadas es el calcio, indicativo que las cenizas promueven una reacción hidráulica y no puzolánica contrario a lo encontrado en la literatura revisada.
- Para futuros estudios, se recomienda utilizar porcentajes de reemplazo mayores, de manera que se pueda determinar cuál es la proporción óptima, dentro de los morteros, y extender la investigación a la realización de mezclas de concreto.

AGRADECIMIENTOS

Extendemos nuestros más sinceros agradecimientos al Centro Experimental de Ingeniería (CEI) de la Universidad Tecnológica de Panamá, puntualmente al personal del Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales, y el personal del Laboratorio de Ensayo de Materiales, por la facilitación de instrumentos y equipos utilizados para los diferentes ensayos mecánicos requeridos en este estudio.

Nuestra gratitud al proyecto Senacyt PFID-INF-2020-048 por facilitar los equipos para los análisis químicos.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] J. Gutenberg Universitaet Mainz. "Long-term carbon dioxide emissions from cement production can be drastically reduced." ScienceDaily. [En línea]. Disponible: www.sciencedaily.com/releases/2021/11/211109120321.htm, [Último acceso: 2021].
- [2] National Ready Mixed Concrete Association. "CIP 30 – Adiciones al cemento." [En línea]. Disponible: <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2020/04/CIP30es.pdf>, 2020.
- [3] M. Bakhshi, B. Laungrong, A. Bonakdar, B. Mobasher, C. Borror & D. Montgomery. "Economical Concrete Mix Design Utilizing Blended Cements, Performance-Based Specifications, and Pay Factors". [En línea]. Disponible: <https://www.semanticscholar.org/paper/Economical-Concrete-Mix-Design-Utilizing-Blended-Bakhshi-Laungrong/50c048726d067a8a50c408d9d659981448139895>, 2013.
- [4] A. Olaniyi, O. Kolapo & A. Olugbenga. "DURABILITY OF BAMBOO LEAF ASH BLENDED CEMENT CONCRETE." IJAEB. [En línea]. 3(05) Disponible: https://ijaeb.org/uploads2018/AEB_03_235.pdf, 2018.
- [5] S. H. Kosmatka, B. Kirchhoff, W. Panarese & J. Tanasi. "Diseño y control de mezcla de concreto." Portland Cement Association. [En línea]. pp 38, 77-92. Disponible: <https://www.udocz.com/apuntes/35148/diseño-de-mezcla-en-español-pca>, 2018.
- [6] Cenizas Volantes [En línea]. Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Cenizas_volantes, 2021.
- [7] A. Zuñiga, F. Farnum, & V. Murillo. "Comparación Del Estrato Arbóreo En Fragmentos De Bosques Urbanos De Margarita, Espinar Y Davis, Provincia De Colón, República De Panamá." Scientia. [En línea]. 31(1), pp. 17-37. Disponible: <https://doi.org/10.48204/j.scientia.v31n1a2>, 2021. [Último acceso: 2021].
- [8] D. Cardona, A. Acevedo, & M. Álvarez. "Caracterización de la ceniza de hojas de bambú y su influencia como material puzolánico en el concreto." 1Library.Co. [En línea]. pp. 69-71. Disponible: <https://1library.co/document/yne62wky-caracterizacion-ceniza-hojas-bambu-influencia-material-puzolanico-concreto.html>, 2013.
- [9] ASTM Designation C109/C109M-16 "Método de Prueba Estándar para la Resistencia a la Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Utilizando Muestras Cúbicas de 2 pulgadas [50 mm])", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, DOI: 10.1520/C0109_C0109M-16, www.astm.org.
- [10] ASTM Designation C1437-15 "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, DOI: 10.1520/C1437-15, www.astm.org.
- [11] A. Neville & Brooks, J. Concrete technology. 2nd Edition. Harlow, England: Prentice Hall, 2010.