

Ceniza de cáscara de coco como sustituto del cemento: Efecto de la temperatura de calcinación

Coconut shell ash as a substitute for cement: effect of calcination temperature

Eliana Williams-Urango¹ ; Dissy Giselle Palacios-Mosquera² ; Ceiler Fabian Cossio-Mena³ ; Oscar Felipe Arbelaez-Perez⁴

¹Universidad Cooperativa de Colombia. Medellín, Colombia. ceiler.cossio@campusucc.edu.co

²Universidad Cooperativa de Colombia. Medellín, Colombia. eliana.williams@campusucc.edu.co

³Universidad Cooperativa de Colombia. Medellín, Colombia. dissy.palacios@campusucc.edu.co

⁴Universidad Cooperativa de Colombia. Medellín, Colombia. oscar.arbelaez@campusucc.edu.co

Autor de correspondencia: Oscar Felipe Arbeláez Pérez; oscar.arbelaez@campusucc.edu.co

Fecha de recepción: 7 de marzo de 2023. Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2023

Resumen– La disposición de la cáscara de coco es un problema de eliminación de desechos en países donde la producción de coco es abundante. Cuando la cáscara de coco se calcina produce cenizas, las cuales son un material aglutinante potencial para preparar hormigón. En este trabajo se calcinó cáscara de coco a 400°C, 500°C y 600°C durante 3 h. Las cenizas producidas se emplearon como sustituto del cemento. Las características de las cenizas se evaluaron por área superficial y DRX. El efecto de la sustitución de las cenizas como sustituto del cemento se evaluó mediante ensayos de trabajabilidad y resistencia mecánica. Los resultados experimentales demostraron que 600°C es la temperatura de combustión más adecuada para la calcinación de la cáscara, con presencia de SiO₂ amorfo y baja superficial alta. Los resultados mostraron que, en contraste con el hormigón de referencia, la temperatura de combustión disminuye la trabajabilidad del concreto. Además, el aumento de la temperatura de calcinación de la cáscara de coco mejora la resistencia mecánica. La resistencia a compresión de la mezcla que incorporó cenizas de cáscara de coco calcinadas a 600°C fue superior a las demás. Se encontró adicionalmente que esta temperatura era convincente considerando el costo de preparar las cenizas.

Palabras clave: Cáscara de coco, residuos agroindustriales, tratamiento térmico, propiedades mecánicas, análisis de costos.

Abstract– The disposal of coconut shell is a waste problem in countries where coconut production is in abundance. When coconut shell is calcinated produces ashes, which are a potential binder material to concrete preparation. In this work, coconut shell was calcinated at 400, 500 and 600 °C for 3 h. The ashes produced were employed as cement substitute. The characteristics of ashes were evaluated by surface area and XRD. The effect of replacing ashes as cement substitute was evaluated by workability and mechanical strength test. Experimental results demonstrated that 600 °C is the most suitable burning temperature for CSA calcination with amorphous SiO₂ and low surface area. Results showed that, in contrast to control concrete, that burning temperature decrease concrete workability of concrete. Further, the increasing of burning temperature of coconut shell improves the mechanical strength. The compressive strength of mixture incorporating the ashes of coconut shell burned at 600 °C was higher than the others. Additionally, this temperature was found convincing considering cost to prepare the ashes.

Keywords: Coconut shell; agro-waste; heat-treatment; mechanical properties; cost analysis.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial crea una necesidad creciente de materiales de construcción, siendo el hormigón,

Citar este artículo como: Williams-Urango, E., Palacios-Mosquera, D. G., Cossio-Mena, C. F., & Arbelaez-Perez, O. F. Ceniza de cáscara de coco como sustituto del cemento: Efecto de la temperatura de calcinación, ITECKNE, vol. 20, (2) 2023. pp. 92 - 98 DOI: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v20i2.3006>

el material de mayor demanda en el mundo [1]. El consumo de hormigón a nivel mundial se estima en 25 mil millones de toneladas anuales [2]. El dominio del hormigón en la industria de la construcción son el resultado de su flexibilidad y adaptabilidad comprobadas, su elevada resistencia y durabilidad, además de los bajos requisitos de mantenimiento durante su vida útil, y la amplia disponibilidad de sus precursores [3] 45% by mass replacement of portland cement (OPC). El hormigón se prepara a partir de agregados de tamaño fino y grueso, material cementante y agua, lo que genera un aumento en el gasto de estos materiales precursores, alrededor de 2.4 toneladas por metro cúbico de hormigón [4]. El hormigón incorpora la mayor parte de los más de 4 mil millones de toneladas de cemento que se producen anualmente en el mundo [5] y es responsable de más del 75% del CO_2 liberado durante su producción [6] de hecho, la fabricación de cemento por sí sola, libera en promedio 800 kg de CO_2 por cada 1000 Kg de cemento producido [7]. Además, los procesos de producción de cemento están asociados con el agotamiento desmedido de la piedra caliza y enormes consumos energéticos [8]

Como resultado del elevado consumo de cemento y los problemas ambientales relacionados con su producción, diferentes investigadores han reportado el uso de residuos agroindustriales con altos contenidos de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 tales como cenizas de bagazo de caña [9], palma de aceite [10], cascarilla de arroz [11] mazorca de maíz [12], cascarilla de maní [13], entre otras, como sustitutos del cemento. Se ha informado, que debido a sus características puzolánicas, estos materiales mejoran la resistencia, al tiempo que brindan la oportunidad de reducir su impacto ambiental negativo, dada la menor liberación de CO_2 cuando se incorporan en la preparación de concretos modificados [14]. Entre los desechos agrícolas, se ha informado que la cáscara de coco es un bioproducto prometedor para producir concreto [15]. En el mundo se producen 60 millones de toneladas de coco anuales [16]. El coco contiene aproximadamente un 15% de cáscara, y anualmente, en toneladas, se descargan alrededor de 9 millones de cáscara de coco como desechos agrícolas, invadiendo grandes cantidades de tierra cultivada y aumentando el riesgo de incendios. A nivel mundial, Colombia ocupa el puesto 28 en producción de coco, en 2019, la producción promedio en Colombia fue 110.000 toneladas anuales [17]. La ceniza proveniente de la cáscara de coco calcinada es un material rico en Al_2O_3 y SiO_2 que se puede utilizar como sustituto aglutinante y mejorar la resistencia del hormigón [18], sin embargo, la investigación al respecto ha sido limitada. Bheel et al [19] afirmaron que el uso de 5%, 10%, 15% y 20% de cáscara de coco calcinada como material cementante modifica la resistencia a la compresión, los autores sugirieron que la sustitución del cemento no debe exceder el 10%, de hecho, para este porcentaje de reemplazo, se encontró una mejora del 8.5% en la resistencia, comportamiento asociado con el efecto de relleno de poros y a sus características puzolánicas. Asimismo, Adeala et al [20] dieron cuenta de la resistencia a la compresión de hormigones que fueron elaborados con sustituciones del 5%, 10%, 15% y 20% del cemento por cenizas; mostraron una mayor resistencia con un reemplazo del 5%, alcanzando 93% de la presentada

por el hormigón de referencia. Estos resultados estuvieron en línea con los hallazgos de Itam et al [21], quienes informaron que la resistencia disminuye cuando se agrega una mayor cantidad de ceniza de cáscara de coco a la mezcla, siendo la sustitución del 5% la más adecuada, de hecho, los autores informaron, que para este porcentaje de reemplazo, la resistencia a la compresión estuvo un 4% por encima del hormigón de referencia.

Con respecto a la sustitución del cemento por residuos agrícolas, se ha informado que la temperatura a la que estos se calcinan, es un parámetro importante durante el proceso de pretratamiento. Shinohara et al, [22] informaron que la cascarilla de arroz calcinada a una temperatura superior a 800°C hace que las fases del sílice cristalicen en cristobalita y tridimita, y que la estructura cristalina afecta la actividad de la ceniza como material puzolánico. De la misma manera Bie et al [23] confirmaron que cuando la cascarilla de arroz se calcina 1 hora a 600°C , y se utiliza como sustituto del 10% del cemento, muestra una elevada área superficial y presencia de SiO_2 amorfo, lo cual mejora en un 27% y en un 15% la resistencia a la compresión y a la flexión, con respecto al hormigón de referencia, respectivamente. Asimismo, los autores informaron que temperaturas superiores generan la formación de SiO_2 cristalino, el cual va en detrimento de la resistencia mecánica. De la misma manera, Cordeiro et al [24] informaron que la ceniza obtenida por calcinación del bagazo de caña, por encima de 800°C presenta una estructura cristalina, y que la calidad de la ceniza mejora controlando parámetros, tales como la temperatura, la tasa de calentamiento, la atmósfera y el tiempo de calcinación. Asimismo, Cao et al [25] informaron que la caolinita presente en el carbón de ganga es de naturaleza amorfa cuando se calcina entre 600°C y 800°C , de hecho, se ha reportado que cuando se calcina a 800°C por un periodo de 2 horas, y se emplea como sustituto del 30% del cemento, induce un aumento del 8.8% en la resistencia [26].

Dado el elevado volumen de producción de cáscara de coco, así como el efecto de la temperatura de calcinación en las características de las cenizas resultantes, y su efecto positivo en la resistencia a compresión, en este artículo se reporta la metodología de diseño y preparación de mezclas y especímenes de hormigón con reemplazo del 5% del cemento por ceniza de cáscara de coco calcinada a 400°C , 500°C y 600°C . La evaluación del asentamiento, la resistencia a compresión y el costo del tratamiento térmico de la cáscara de coco fue explorado en este trabajo. Se espera determinar la temperatura de calcinación más adecuada para producir hormigones modificados con propiedades mecánicas mejoradas en comparación con el hormigón de referencia.

2. METODOLOGÍA

2.1 Caracterización del cemento y los materiales pétreos

En este trabajo se utilizó cemento Portland (Argos Tipo I) para preparar las mezclas de hormigón. El cemento presentó

una densidad de 3050 Kg/m³ esta, se determinó según los procedimientos descritos en la norma ASTM C15. Las propiedades de los precursores pétreos empleados en este trabajo se determinaron según los procedimientos de la norma ASTM y se reportan en la Tabla 1.

TABLA 1.
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PETREOS

Característica/Norma ASTM	Agregados gruesos	Agregados finos
Tamaño máximo nominal (mm)/ASTM C-33	25.4	n.a
Módulo de finura ASTM C-136	n.a	3.77
Gravedad específica/ASTM C127	2.44	2.58
Absorción de agua (%) /ASTM C-127	1.01	0.50
Densidad (Kg/m3)/ ASTM C-136	2500	2610

Fuente: Autores.

2.2 Pretratamiento y calcinación de la cáscara de coco

La cáscara de coco utilizada en este trabajo fue recolectada en el municipio de Cauca en Antioquia, Colombia, ubicada dentro de las coordenadas geográficas de 7°59'05"N 75°11'53"O. La fibra de coco se eliminó manualmente de la cáscara. Previo al proceso de calcinación, la cáscara de coco fue martillada y triturada en trozos más pequeños. La cáscara de coco se calcinó en una mufla (Terrígeno) con una potencia de 3200 W a temperaturas de calcinación de 400°C, 500°C y 600°C durante 3 h, a una rampa de 5°C/min.

La pérdida de masa de las cenizas después del proceso de calcinación se calculó tal como lo describe la ecuación 1.

$$Pérdida\ de\ masa = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

En la ecuación 1, m_i : masa de la cáscara de coco antes de la calcinación, m_f : masa de la ceniza

Las cenizas obtenidas se molieron en un molino casero y se tamizaron, obteniendo el mismo tamaño de partícula del cemento. El área superficial de la ceniza de cáscara de coco se calculó a partir de su isoterma de absorción a 77 K, empleando un equipo de quimisorción Micromeritics Autochem II 2920. Previo al análisis, las muestras de ceniza se desgasificaron a 150°C. Los difractogramas de las muestras calcinadas se obtuvieron por difracción de rayos X (difractómetro Bruker Advance), las condiciones de operación fueron: 20 mA y 40 kV, en un ángulo de difracción 2θ entre 5° y 70°. Los patrones de difracción se compararon con el archivo JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards de sus iniciales en inglés).

2.3 Cálculo de la dosificación de las mezclas

La dosificación de las mezclas se determinó acorde a la metodología ACI 211.1-9. Estas se diseñaron empleando una relación entre el agua y el cemento de 1 a 0.6. Asimismo, el asentamiento y la resistencia de diseño fueron 0.1 m y 21

MPa, respectivamente. La mezcla de referencia se preparó utilizando 603 y 946 kg de material fino y de material grueso, además de 440 kg y 382 kg de cemento y agua, respectivamente. La preparación de las mezclas modificadas incluyó la sustitución de 5% de cemento en masa, por ceniza de cáscara de coco, calcinada a 400°C, 500°C y 600°C, las cuales se denotaron como CC-400, CC-500, CC-600, individualmente.

2.4 Elaboración de los hormigones: mezclas y probetas

La metodología NTC 550, tal como fue reportada previamente por Blanchar et al [27], se tomó como referencia para la elaboración de las mezclas. En la primera etapa del proceso, los agregados gruesos y finos y el 75% del agua se mezclaron durante 240 s, empleando un mezclador Bauker. En la siguiente etapa se agregó el cemento, la ceniza y el 25% del agua restante y luego se mezcló durante 240 s más. El asentamiento del hormigón se midió de acuerdo con la norma ASTM C143. Las mezclas de hormigón se colocaron en cilindros de 0.1 m de diámetro y 0.2 m de profundidad. Se prepararon cuatro cilindros para cada mezcla. Todas las muestras de hormigón se cubrieron con plástico por 24 horas y, posteriormente, se curaron en agua.

2.5 Cálculo de las propiedades mecánicas

Al cumplimiento del tiempo de fraguado (28 días), las probetas se removieron del agua de curado. La resistencia a la compresión de las probetas se determinó empleando un equipo de compresión simple marca Pilot, con una velocidad de carga de 0.5 KN/s. Para la resistencia a compresión se tomó en cuenta el análisis de la varianza de los datos obtenidos para lo cual se utilizó el programa Minitab Statistical Software

2.6 Análisis de costos

El costo de la calcinación de la cáscara de coco se realizó tal como lo describe la ecuación 1, teniendo en cuenta el costo de la calcinación y el costo del cemento empleado por cada mezcla.

$$C_{CC} = P \cdot t \cdot C \quad (1)$$

Donde C_{CC} es el costo de calcinación de la cáscara de coco, P es la potencia de la mufla (3200 kW), t es el tiempo de uso de la mufla y C es el valor del kWh en la zona de trabajo 288.05 pesos colombianos/kWh. El tiempo de uso incluyó el requerido para alcanzar la temperatura de calcinación a una rampa de 5°C/min, así como el tiempo de calcinación por un periodo de 3 horas. El tiempo de enfriamiento no se tuvo en cuenta dado que este fue por convección natural.

Asimismo, para el cálculo del costo de la preparación del hormigón se tomaron en cuenta las cantidades de material para preparar un metro cúbico, y los valores comerciales de cada uno de los materiales, que para este trabajo se tuvieron en cuenta los siguientes valores; cemento 440 \$/kg, agregados finos 240\$/kg, y 210\$/kg. El costo por cada metro cúbico

de hormigón se calculó como la sumatoria de la cantidad de cada material*valor de cada Kg de material, incluyendo el cemento y los dos tipos de agregados.

3. RESULTADOS

Con respecto a los porcentajes de pérdida después de la calcinación; el porcentaje de pérdida calculado, tal como lo describe la ecuación 1, estuvo alrededor del $53 \pm 0.9\%$, 51 ± 1.1 y $55.28 \pm 1.4\%$ para las cenizas calcinadas a temperaturas de 400°C , 500°C y 600°C , respectivamente. Las pérdidas de masa en la calcinación pueden asociarse a la pérdida de carbono y compuestos, las cuales han sido reportadas en este rango de temperatura [24].

Estos resultados indican también que las condiciones de calcinación adoptadas son suficientes para eliminar el carbono y los compuestos volátiles, principalmente para temperaturas superiores a 600°C .

La Tabla 2 muestra el área superficial de las cenizas.

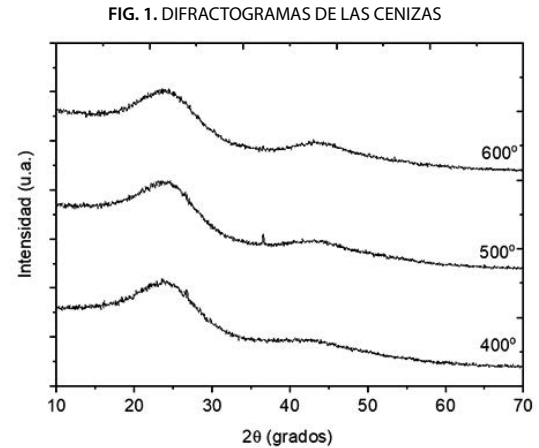
TABLA 2.
CARACTERÍSTICAS DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE COCO

Ceniza de cáscara de coco	Área superficial (m ² /g)
CSA-400	600.8
CSA-500	503.3
CSA-600	455.9

Fuente: Autores.

La Tabla 2 muestra que la temperatura de calcinación tiene un efecto inverso en el área superficial de las cenizas, siendo menor a mayor temperatura de calcinación. La ceniza de calcinada a 400°C presentó un área superficial alrededor de $600 \text{ cm}^2/\text{g}$, mientras que la ceniza calcinada a 500°C y 600°C presentó disminuciones del 17% y del 24%, respectivamente. Estos resultados están en concordancia con los reportes de Bie et al [23], quienes informaron de una disminución del 68% cuando la cascarilla de arroz, modificó su temperatura de calcinación de 600°C y 800°C , al igual que estuvieron alineados con los reportes de Agwa et al [28], quienes notificaron que cuando la cáscara de coco pasa de ser calcinada de 400°C a 500 , 600 , 700 y 800°C presenta una disminución del 2.0, 3.6, 4.6 y 4.9%, respectivamente. Se ha informado previamente, que una mayor temperatura de calcinación provoca una mayor exposición de volátiles y combustión de carbono, lo que genera una mayor exposición de la estructura porosa reticular interna de los residuos agrícolas, por lo cual, la superficie exterior se desprende total o parcialmente generando la sinterización y fusión de las cenizas, lo que conlleva un cierre de los poros de las partículas de ceniza, y provoca un descenso en el área superficial [29].

La Figura 1 muestra los resultados de los análisis DRX de las cenizas preparadas.

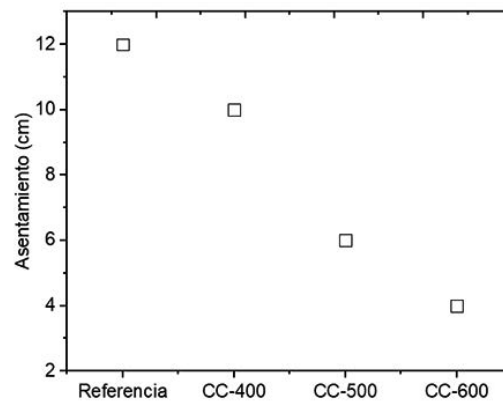


Fuente: autores

La figura 1 muestra que las cenizas calcinadas son amorfas, en el rango de temperatura entre 400°C y 600°C . Los resultados encontrados están en coherencia con los reportes de Bie et al [23], quienes informaron que la cascarilla de arroz calcinada por debajo de 600°C no presenta picos de difracción, así como con los reportes de Lyra et al [30], quienes han informado que una temperatura de calcinación por debajo de 600°C no promueve la cristalización del sílice. Rozainee et al. [31] informaron de manera general que la cristalización de la cascarilla de arroz se puede evitar haciendo funcionar el horno a un rango de temperatura más bajo (hasta 600°C). Memom et al [32] también observaron que después de 600°C , los difractogramas de cenizas de tallo de maíz mostraban picos cristalinos intensos.

La Figura 2 muestra los resultados del asentamiento

FIG. 2. ASENTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ELABORADAS

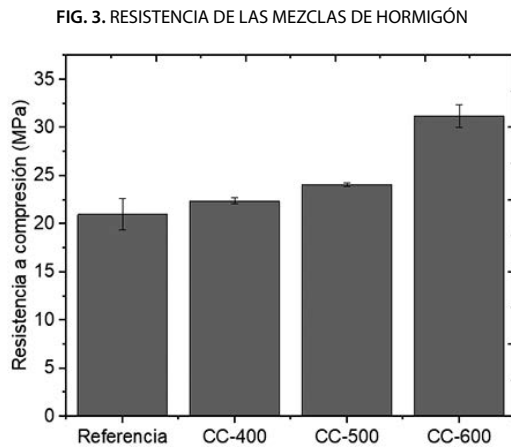


Fuente: Autores.

Los resultados de la Figura 2 mostraron que un incremento en la temperatura provoca una disminución del asentamiento. Las mezclas de concreto CC-400, CC-500 y CC-600 presentaron un asentamiento menor al concreto de referencia (0.12 m). Los hormigones preparados con ceniza de cáscara de coco calcinada a 400°C , 500°C y 600°C

disminuyeron en un 17%, 50% y 66%, respectivamente, cuando se le compara con el asentamiento de la mezcla de control. El comportamiento decreciente del asentamiento frente al aumento de la temperatura está relacionado con la disminución del área superficial, y con la elevada cantidad de agua que la ceniza puede absorber, lo que provoca una disminución de la cantidad de agua libre que se encuentra disponible en la mezcla y por tanto un menor asentamiento de la mezcla en estado fresco. Los resultados encontrados están en concordancia con los reportes de Santhosh et al [33], quienes informaron que una estructura porosa es responsable de una mayor demanda de agua y por tanto de una menor trabajabilidad en mezclas de hormigón preparado con ceniza de aceite de palma y de cascarilla de arroz.

La resistencia a compresión y la desviación estándar de las mezclas de hormigón se muestra en la Fig. 3.



Fuente: Autores.

Para la resistencia a la compresión, los resultados del análisis de varianza se presentan en la Tabla 3.

De la Tabla 3 se aprecia que la ceniza afecta la resistencia a la compresión, y, además, existe variación estadísticamente significativa entre los tres tipos de ceniza; es decir, las cenizas no son iguales e influyen en la resistencia a la compresión. Como se puede apreciar de la Figura 3, todas las mezclas de hormigón preparadas con ceniza mostraron mayor resistencia que la mezcla tradicional. Resultados que estuvieron en línea con los reportes previos de la literatura, donde se han

mencionado aumentos del 8.5% para sustituciones del 5% del cemento por ceniza de cáscara de coco [19]. De la Figura 3 se aprecia además que el aumento de la temperatura tiene un efecto positivo en la resistencia. Para las mezclas de hormigón preparadas con ceniza de cáscara de coco calcinadas a 400°C, 500°C y 600°C, se encontraron aumentos de la resistencia del 4.3%, 5.2% y 9.1%, con respecto a la mezcla de hormigón tradicional, en concordancia con los reportes de Guo et al [26]. Este comportamiento puede relacionarse con una disminución del área superficial con la temperatura a la que se calcina la ceniza, de hecho, se ha informado que una menor área superficial afecta positivamente la eficiencia de llenado de los espacios vacíos, lo que resulta en un mayor grado de hidratación y una microestructura más compacta en el hormigón, lo que provoca una mayor resistencia [34]. Se ha informado para el caso de la cascarilla de arroz, que cuando esta se calcina a 600°C se forma un material cementante de alta actividad puzolánica debido a su SiO₂ amorfo y su baja área superficial, lo que mejora su resistencia a la compresión [29]. Asimismo, a mayores temperaturas de calcinación (i.e. 700°C la ceniza presenta baja actividad puzolánica, debido a la presencia de SiO₂ cristalino y baja área superficial [23]. Esta tendencia fue reportada previamente para cenizas residuales del proceso de combustión de residuos de biomasa [35], [36].

Los costos de calcinación de la cascarilla de arroz se presentan en la Tabla 4.

Los resultados de la Tabla 4 muestran que el aumento de la temperatura aumenta el costo de calcinación de la cáscara de coco. Se observa, que los menores costos energéticos se obtuvieron cuando la ceniza fue calcinada a 400°C, los cuales fueron alrededor de 1.0 USD por cada kilogramo de ceniza obtenida, sin embargo, a estas condiciones no se obtuvo el mejor desempeño de la mezcla de hormigón. A una temperatura de calcinación de 600°C, se encontró un costo alrededor de 1.16 USD por kilogramo, debido al aumento en el tiempo que duraba la calcinación. El aumento en los costos no son altamente significativos durante el pretratamiento de la cáscara de coco, sin embargo, un aumento en la resistencia alrededor del 9% hace que la ceniza de cáscara de coco calcinada a 600°C sea una estrategia viable técnica y económicamente para su aprovechamiento como sustituto del cemento. Cabe destacar que, en este estudio se utilizó la mufla para controlar la temperatura de calcinación y así determinar la temperatura más adecuada para un mejor desempeño de la ceniza de cáscara de coco.

TABLA 3. ANALISIS DE VARIANZA DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
CC-400	3	67.5	22.50	0,31
CC-500	3	73.6	24,53	0,20
CC-600	3	94.7	31,57	1,20

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	135.81	2	67.90	118.666019	1.4992E-05	5.14325285
Dentro de los grupos	3.43	6	0.57			
Total	139.24	8				

Fuente: Autores.

TABLA 4. COSTOS DE CALCINACIÓN DE LA CÁSCARA DE COCO

Ceniza de cáscara de coco	Costo (USD/Kg)*
CSA-400	10.04
CSA-500	10.83
CSA-600	11.61

* Tasa de cambio de 4700 USD/pesos

Fuente: Autores.

Con respecto al costo de fabricación de un metro cúbico de hormigón tradicional, el costo estuvo alrededor de un costo aproximado de \$565.000 pesos colombianos, mientras que para el hormigón que presentó la mayor resistencia a la compresión; es decir el preparado con ceniza de cáscara de coco calcinada a 600°C, el costo del hormigón estuvo alrededor de \$656.830 colombianos, el cual, como se mencionó anteriormente no es altamente significativo. No obstante, se ha reportado que para la producción, a gran escala, es recomendable utilizar sistemas de lecho fluidizado, en los que la producción de cenizas para su posterior uso como material cementante se pueden hacer de forma concomitante, lo que asocia menores costos de producción [37].

4. CONCLUSIONES

La sustitución de un 5% en peso de cemento por cáscara de coco calcinada a 400, 500 y 600°C, se evaluó en este trabajo. Basados en los hallazgos experimentales, se concluye que:

La cáscara de coco calcinada en un rango de temperatura entre 400°C y 600°C presentó una disminución en el área superficial con el incremento de la temperatura de calcinación, sin embargo, dentro de la ventana de temperatura la sílice presentó naturaleza amorfa. El incremento de la temperatura, generó una disminución del asentamiento de las mezclas de hormigón.

En cuanto a la resistencia, se encontró que la temperatura de calcinación más adecuada es 600°C, debido a los mejores comportamientos mecánicos, superiores a la mezcla de control.

En términos de costos, existe un aumento en el precio del pretratamiento térmico de la cáscara de coco con el aumento de la temperatura, de hecho, para la cáscara calcinada a mayor temperatura (600°C) se encontró un aumento de alrededor de 1 USD con respecto a la calcinada a menor temperatura (400°C), sin embargo, en cuanto al desempeño mecánico, se encontró mejoras alrededor del 4% y del 9%, a temperaturas de 400°C y 600°C, respectivamente.

La mejora presentada en el comportamiento mecánico del hormigón modificado con ceniza de cáscara de coco, se convierte en una estrategia de sostenibilidad ambiental y viabilidad económica para la gestión y aprovechamiento de residuos agroindustriales. Al mismo tiempo que permite la reducción de carga ambiental asociada con la industria del hormigón.

Finalmente, los resultados obtenidos muestran la incorporación de ceniza de cáscara de coco calcinada, se percibe como

una solución prometedora para reducir el impacto ambiental de este tipo de residuos en términos de contaminación y eliminación de residuos. Sin embargo, se requieren similares con otro tipo de biomasa regionales y altamente disponibles, asimismo se requiere profundizar en el estudio de análisis de costos, que incluyan, entre otros, los costos de transporte de la biomasa, los costos asociados al incremento en la mano de obra y/o equipos empleados para manipular las mezclas de hormigón modificado, debido a la disminución de la trabajabilidad por la sustitución de cemento por ceniza de cáscara de coco.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto INV2731 por el apoyo financiero en el desarrollo de este trabajo de investigación. C. Cossio, E. Williams y D. Palacios agradecen especialmente al semillero de investigación en materiales y estructuras.

6. REFERENCIAS

- [1] Y. A. Villagrán-Zaccardi, A. T. M. Marsh, M. E. Sosa, C. J. Zega, N. De Belie, and S. A. Bernal, "Complete re-utilization of waste concretes-Valorisation pathways and research needs", *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 177, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105955>
- [2] J. Pokorný, R. Ševčík, J. Šál, L. Fiala, L. Zárybnická, and L. Podolka, "Bio-based aggregate in the production of advanced thermal-insulating concrete with improved acoustic performance", *Constr. Build. Mater.*, vol. 358, no. March, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129436>
- [3] K. Celik *et al.*, "High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 45, pp. 136-147, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.003>
- [4] W. Xing, V. W. Tam, K. N. Le, J. L. Hao, and J. Wang, "Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review", *Constr. Build. Mater.*, vol. 317, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125950>
- [5] S. A. Miller, G. Habert, R. J. Myers, and J. T. Harvey, "Achieving net zero greenhouse gas emissions in the cement industry via value chain mitigation strategies", *One Earth*, vol. 4, no. 10, pp. 1398-1411, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.09.011>
- [6] S. A. Miller, A. Horvath, and P. J. M. Monteiro, "Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%", *Environ. Res. Lett.*, vol. 11, no. 7, 2016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074029>
- [7] A. Alsaman, L. N. Assi, R. S. Kareem, K. Carter, and P. Ziehl, "Energy and CO₂ emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete", *Clean. Environ. Syst.*, vol. 3, no. April, p. 100047, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100047>
- [8] M. N. Amin, T. Murtaza, K. Shahzada, K. Khan, and M. Adil, "Pozzolanic potential and mechanical performance of wheat straw ash incorporated sustainable concrete", *Sustain.*, vol. 11, no. 2, pp. 1-20, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11020519>
- [9] S. Bangar, S. Phalke, A. Gawade, R. Tambe, and A. Rahane, "A review paper on replacement of cement with bagasse", *Int. J. Eng. Sci. Manag.*, vol. 7, no. March, pp. 127-131, 2017.
- [10] H. M. Hamada *et al.*, "Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: A comprehensive review", *J. Build. Eng.*, vol. 40, no. July 2020, p. 102286, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102286>

- [11] A. Siddika, M. A. Al Mamun, R. Alyousef, and H. Mohammadhosseini, "State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete", *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 33, no. 5, pp. 294-307, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.10.006>
- [12] S. Ali, U. Javed, and R. Arsalan, "Eco-friendly utilization of corncob ash as partial replacement of sand in concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 195, pp. 165-177, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.063>
- [13] S. Kumari and R. Walia, "Life cycle assessment of sustainable concrete by utilizing groundnut husk ash in concrete", *Mater. Today Proc.*, vol. 49, pp. 1910-1915, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.082>
- [14] X. Li *et al.*, "A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications", *J. Build. Eng.*, vol. 45, no. July 2021, p. 103447, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103447>
- [15] R. Tomar, K. Kishore, H. Singh Parihar, and N. Gupta, "A comprehensive study of waste coconut shell aggregate as raw material in concrete", *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 437-443, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.754>
- [16] H. Liu, Q. Li, and S. Ni, "Assessment of the engineering properties of biomass recycled aggregate concrete developed from coconut shells", *Constr. Build. Mater.*, vol. 342, no. PA, p. 128015, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128015>
- [17] E. Quiñones-Bolaños, M. Gómez-Oviedo, J. Mouthon-Bello, L. Sierra-Vitola, U. Berardi, and C. Bustillo-Lecompte, "Potential use of coconut fibre modified mortars to enhance thermal comfort in low-income housing", *J. Environ. Manage.*, vol. 277, no. October 2020, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111503>
- [18] E. E. Ikponmwoosa, S. Ehikhenmen, J. Emeshie, and A. Adesina, "Performance of Coconut Shell Alkali-Activated Concrete: Experimental Investigation and Statistical Modelling", *Silicon*, vol. 13, no. 2, pp. 335-340, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00435-z>
- [19] N. Bheel, S. K. Mahro, and A. Adesina, "Influence of coconut shell ash on workability, mechanical properties, and embodied carbon of concrete", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 5, pp. 5682-5692, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10882-1>
- [20] A. J. Adeala, J. O. Olaoye, and A. A. Adeniji, "Potential of Coconut Shell Ash as Partial Replacement of Ordinary Portland Cement in Concrete Production", *Int. J. Eng. Sci. Invent.*, vol. 9, no. 1, pp. 47-53, 2020.
- [21] Z. Itam, A. Dzar Johar, A. Syamsir, M. Zainoodin, S. M. M. Shaikh Ahmad Fadzil, and S. Beddu, "Utilization of coconut shell as a supplementary cementitious material in concrete", *Mater. Today Proc.*, vol. 66, pp. 2818-2823, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.522>
- [22] Y. Shinohara and N. Kohyama, "Quantitative Analysis of Tridymite and Cristobalite Crystallized in Rice Husk Ash by Heating", *Ind. Health*, vol. 42, no. 2, pp. 277-285, 2004. <https://doi.org/10.2486/indhealth.42.277>
- [23] R. S. Bie, X. F. Song, Q. Q. Liu, X. Y. Ji, and P. Chen, "Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 162-168, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.008>
- [24] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, and E. M. R. Fairbairn, "Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 10, pp. 3301-3303, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>
- [25] Z. Cao, Y. Cao, H. Dong, J. Zhang, and C. Sun, "Effect of calcination condition on the microstructure and pozzolanic activity of calcined coal gangue", *Int. J. Miner. Process.*, vol. 146, pp. 23-28, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.11.008>
- [26] Z. Guo, J. Xu, Z. Xu, J. Gao, and X. Zhu, "Performance of cement-based materials containing calcined coal gangue with different calcination regimes", *J. Build. Eng.*, vol. 56, no. June, p. 104821, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104821>
- [27] V. Blanchar, E. Villalba, S. Monsalve and O. Arbelaez, "Propiedades mecánicas y térmicas de plásticos triturados y pelletizados", *Iteckne.*, vol. 19, no. 2. 2022. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v19i2.2789>
- [28] I. S. Agwa, A. M. Zeyad, B. A. Tayeh, and M. Amin, "Effect of different burning degrees of sugarcane leaf ash on the properties of ultrahigh-strength concrete", *J. Build. Eng.*, vol. 56, no. May, p. 104773, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104773>
- [29] Z. Chang, G. Long, Y. Xie, and J. L. Zhou, "Pozzolanic reactivity of aluminum-rich sewage sludge ash: Influence of calcination process and effect of calcination products on cement hydration", *Constr. Build. Mater.*, vol. 318, no. December 2021, p. 126096, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126096>
- [30] G. P. Lyra, M. V. Borrachero, L. Soriano, J. Payá, and J. A. Rossignolo, "Comparison of original and washed pure sugar cane bagasse ashes as supplementary cementing materials", *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, p. 122001, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122001>
- [31] M. Rozainee, S. P. Ngo, A. A. Salema, and K. G. Tan, "Fluidized bed combustion of rice husk to produce amorphous siliceous ash", *Energy Sustain. Dev.*, vol. 12, no. 1, pp. 33-42, 2008. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60417-2](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60417-2)
- [32] S. A. Memon, S. Khan, I. Wahid, Y. Shestakova, and M. Ashraf, "Evaluating the Effect of Calcination and Grinding of Corn Stalk Ash on Pozzolanic Potential for Sustainable Cement-Based Materials", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2020, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1619480>
- [33] K. G. Santhosh, S. M. Subhani, and A. Bahurudeen, "Recycling of palm oil fuel ash and rice husk ash in the cleaner production of concrete", *J. Clean. Prod.*, vol. 354, no. November 2021, p. 131736, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131736>
- [34] W. Cao, W. Yi, J. Peng, J. Li, and S. Yin, "Recycling of phosphogypsum to prepare gypsum plaster: Effect of calcination temperature", *J. Build. Eng.*, vol. 45, no. September 2021, p. 103511, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103511>
- [35] M. W. Clark *et al.*, "High-efficiency cogeneration boiler bagasse-ash geochemistry and mineralogical change effects on the potential reuse in synthetic zeolites, geopolymers, cements, mortars, and concretes", *Heliyon*, vol. 3, no. 4, p. e00294, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00294>
- [36] B. S. Thomas, J. Yang, K. H. Mo, J. A. Abdalla, R. A. Hawileh, and E. Ariyachandra, "Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review", *J. Build. Eng.*, vol. 40, no. July 2020, p. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102332>
- [37] A. S. Ruviano *et al.*, "Characterization and investigation of the use of oat husk ash as supplementary cementitious material as partial replacement of Portland cement: Analysis of fresh and hardened properties and environmental assessment", *Constr. Build. Mater.*, vol. 363, no. September 2022, p. 129762, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129762>