



Transformando desechos agroindustriales en productos útiles: cemento a base de ceniza de cascarilla de arroz

Transforming agroindustrial waste into useful products: cement-based on rice husk ash

Lester J. Espinoza Pérez*, Marion S. Morales Silva, Fernando Y. Vargas Rizo

Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química. Managua, Nicaragua.

*lester.espinoza@fiq.uni.edu.ni

(recibido/received: 14-mayo-2023; aceptado/accepted: 27-agosto-2023)

RESUMEN

Se prepararon a escala de laboratorio pastas de cemento variando el % de CCA y el % de cal (90-10, 80-20 y 70-30), el % de Na₂O utilizado como activador alcalino (6, 8 y 10 %) y la temperatura de fraguado (80, 90 y 100 °C). Se prepararon 9 pastas en total, obteniendo resultados significativos de resistencia a la compresión a 28 días de curado. La mezcla óptima fue elaborada con 90% CCA – 10% cal, activada con 10% de Na₂O en forma de silicato de sodio y fraguada a 100 °C por 24 horas. Del análisis de varianza se dedujo que el % de CCA y % de cal es la variable que afecta mayoritariamente los valores de resistencia a compresión obtenidos. Por espectroscopia infra roja se confirmó que la activación alcalina con silicato de sodio tuvo un efecto sobre la red tridimensional de SiO₂ de la CCA, generando productos de reacción diferentes a la materia prima de partida.

Palabras claves: cemento alcalino; ceniza de cascarilla de arroz; resistencia a compresión.

ABSTRACT

Cement pastes were prepared on a laboratory scale, varying the % of CCA and the % of lime (90-10, 80-20 and 70-30), the % of Na₂O used as alkaline activator (6, 8 and 10%) and the setting temperature (80, 90 and 100 °C). A total of 9 pastes were prepared, obtaining significant compressive strength results at 28 days of curing. The optimal mixture was made with 90% CCA - 10% lime, activated with 10% Na₂O in the form of sodium silicate and set at 100 °C for 24 hours. From the analysis of variance it was deduced that the % of CCA and % of lime is the variable that mainly affects the values of compressive strength obtained. By infrared spectroscopy it was confirmed that the alkaline activation with sodium silicate had an effect on the three-dimensional network of SiO₂ of the CCA, generating different reaction products to the starting raw material.

Keywords: alkaline cement; rice husk ash; compressive strength.

1. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la población mundial trae consigo una serie de demandas que requieren solventarse tales como alimentos, agua potable, nuevas urbanizaciones, adecuados tratamientos de grandes volúmenes de desechos sólidos, entre otros. En el ámbito nacional, en el 2014, el 45.5% de la población

nicaragüense vivía en asentamientos informales y/o viviendas inadecuadas (Jordán et al., 2017), lo cual también se asocia con el constante incremento del precio en los materiales de construcción. Después del agua, el concreto de cemento Portland (CP) es el segundo producto de mayor consumo a nivel mundial, sobre todo para la construcción de infraestructura y viviendas. Sin embargo, la obtención de CP implica un alto consumo energético y grandes emisiones de gases de efecto invernadero, se dice que la producción de 1 kg de CP emite al ambiente aproximadamente 1 kg de CO₂ (Escalante García, 2002). Una alternativa sustentable es la activación química y térmica de desechos urbanos, industriales y del agro para la obtención de cementos alcalinos, con excelentes propiedades mecánicas (V. N. Castaldelli et al., 2016; Escalante-García et al., 2009; Payá et al., 2017; Torres-Carrasco et al., 2014). Desechos tales como botellas de vidrio (Torres-Carrasco & Puertas, 2017), escoria de alto horno (Vinícius N. Castaldelli et al., 2013), cenizas volantes (Arellano Aguilar et al., 2010), arena pómez (Allahverdi et al., 2008), cenizas de bagazo de caña de azúcar (De Soares et al., 2016) y cenizas de cascarilla de arroz (Tong et al., 2018), poseen una estructura amorfa rica en sílice (SiO₂) que los hace termodinámicamente inestables y químicamente muy reactivos frente a los álcalis, dando productos de reacción muy similares a los obtenidos al hidratar el cemento Portland.

En Nicaragua, el arroz es uno de los cultivos más importantes dentro del sector agropecuario. Para el ciclo 2021-2022 el sector arrocero nicaragüense registró una producción de 540 millones de kilogramos (Bolsa Agroindustrial Upanic, 2021). La cascarilla de arroz es la cubierta exterior del arroz y en promedio representa el 20% del arroz producido. Dicha cascarilla se quema en incineradores simples para calentar aire que a su vez se utiliza para secar el grano de arroz, generando una alta cantidad de ceniza (entre el 13 y el 29% del peso inicial) rica en sílice amorfa (~90%), con propiedades cementosas *per se* o latentes. Se estima que tan solo en el ciclo 2021-2022 se produjo en Nicaragua ~ 23 millones de toneladas de ceniza de cascarilla de arroz (si toda la cascarilla generada se quemara).

El presente trabajo evaluó la factibilidad de utilizar la ceniza de cascarilla de arroz (rica en SiO₂) combinándola con cal hidratada, Ca(OH)₂ como fuente de iones de Ca²⁺, y activando sus propiedades cementosas con silicato de sodio (Na₂SiO₃) grado industrial. Se obtuvieron resistencias a la compresión de entre 5 y 10 MPa a 28 días de curado, lo que demuestra la factibilidad técnica de utilizar este desecho en grandes volúmenes para producir cementos sustentables.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Para la fabricación de las pastas se utilizó como fuente de sílice: ceniza de cascarilla de arroz (CCA) que se obtuvo del trillo Santa Rosa situado en Granada, Nicaragua. En el trillo Santa Rosa, la cascarilla de arroz se quema en un incinerador simple para el calentamiento de aire que será utilizado para el secado del grano de arroz, y se quema por encima de los 500 °C hasta obtener la ceniza de cascarilla de arroz (CCA).

Los cementos obtenidos a partir de activación alcalina de materiales ricos en SiO₂, tal como la CCA, presentan excelentes propiedades mecánicas (Payá et al., 2017; Tong et al., 2018), sin embargo, carecen de hidraulicidad. El CP es un ligante hidráulico que mezclado con agua forma una pasta que fragua, endurece y conserva su resistencia y estabilidad, incluso bajo el agua. El silicato de calcio hidratado (C-S-H) es el principal responsable de las propiedades mecánicas e hidráulicas del CP hidratado. Básicamente, el C-S-H se forma por reacciones entre el CaO y el SiO₂ del CP, en presencia de H₂O. Por tal razón, un cemento sustentable formulado solamente a partir de materiales ricos en SiO₂ carece de hidraulicidad (Avila-López et al., 2015; Menchaca-Ballinas & Escalante-García, 2020). Se ha demostrado en la literatura que los sistemas binarios SiO₂-CaO conducen a la formación de productos de reacción similares al silicato de calcio hidratado (C-S-H) obtenido de la hidratación del CP. Por lo anterior, en el presente trabajo de investigación se utilizó Ca(OH)₂ (cal hidratada o cal apagada) como fuente de iones Ca²⁺. La cal utilizada fue de la marca CALIDRA, distribuida y producida por PREFANICSA, es un hidróxido de calcio utilizado en el sector

construcción para la fabricación de morteros de albañilería según la norma ASTM C270 y para estabilización de suelo de suelos arcilloso en caminos, carreteras o terrazas.

Por otra parte, se utilizó silicato de sodio líquido (Na_2SiO_3) grado industrial (proveído por TRANSMERQUIM de Nicaragua S.A) para activar las propiedades cementosas de la CCA. Por su estado de agregación, el silicato de sodio también aportó agua a las mezclas, lo cual tuvo que ser considerado en el diseño de cada uno de los tratamientos.

Finalmente, para el amasado se utilizó agua potable del laboratorio de materiales y suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). La relación agua/ligante fue de 0.5/1 para todos los tratamientos.

2.2 Métodos

Las variables y niveles de estudio fueron las siguientes:

- % p/p de CCA-cal: 90-10, 80-20 y 70-30%.
- Concentración de Na_2O en forma de silicato de sodio: 6, 8 y 10% en peso con respecto al peso de CCA+cal.
- Temperatura de fraguado: 80, 90 y 100 °C, por 24 horas.

Se utilizó un arreglo ortogonal Taguchi L_9 (3^3), presentado en la Tabla 1:

Tabla 1. Arreglo ortogonal Taguchi L_9 (3^3)

Mezcla	% CCA-% cal	Na_2O (% en peso con respecto al peso del ligante)	Temperatura de curado (°C)
M1	90-10	6	80
M2	90-10	8	90
M3	90-10	10	100
M4	80-20	6	90
M5	80-20	8	100
M6	80-20	10	80
M7	70-30	6	100
M8	70-30	8	80
M9	70-30	10	90

Inicialmente se secó la CCA en una mufla a 110 °C por 24 horas, después se pasó por un tamiz ASTM E-11 malla 230 (63 μm), el material que pasó por la malla 230 fue utilizado como ligante en combinación con cal. Para la preparación de cada una de las 9 mezclas de la Tabla 1, se pesaron todos los materiales (CCA, cal, silicato de sodio y agua), se prepararon lotes de 1 kg. Posteriormente se mezclaron ambos ligantes (CCA y cal) por un minuto a velocidad baja en una mezcladora de tazón y paleta marca Hobart N°50. Se añadió silicato de sodio y agua y se mezcló por 3 minutos a velocidad media. La pasta resultante se vertió en moldes cúbicos de 5 cm por lado, se apisonó para compactar y eliminar burbujas en el interior y los moldes se cubrieron con papel aluminio para evitar pérdidas de agua por evaporación. Por cada pasta se fraguaron por 24 horas 3 especímenes cúbicos al régimen de temperatura establecido en la columna 4 de la Tabla 1, posteriormente los cubos fueron desmoldados y se curaron a temperatura ambiente hasta por 28 días. Finalizados los 28 días se midió la resistencia a compresión (RC) en una máquina de ensayos ELE INTERNATIONAL 250 y se reportó el promedio y desviación estándar de las 3 mediciones. Después del

ensayo mecánico se recolectaron muestras selectas de pastas que fueron sumergidas en alcohol etílico al 96% para detener las reacciones de “hidratación”, luego de una semana fueron secadas en mufla a 110 °C por 2 horas y analizadas con un espectroscopio infrarrojo marca Mattson Génesis modelo Alpha.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resistencia a compresión (RC)

En la columna 5 de la Tabla 2 se presentan los resultados de RC obtenidos para las 9 pastas formuladas. Se reporta el promedio y la desviación estándar de 3 mediciones por pasta.

Tabla 2. RC obtenida para las 9 pastas formuladas

Mezcla	% CCA-% cal	Na ₂ O (% en peso con respecto al peso del ligante)	Temperatura de curado (°C)	28 días-RC (MPa)
M1	90-10	6	80	5.46 (±1.20)
M2	90-10	8	90	5.86 (±0.16)
M3	90-10	10	100	9.73 (±1.19)
M4	80-20	6	90	1.26 (±0.18)
M5	80-20	8	100	2.26 (±0.18)
M6	80-20	10	80	0.75 (±0.06)
M7	70-30	6	100	1.06 (±0.03)
M8	70-30	8	80	0.79 (±0.07)
M9	70-30	10	90	0.78 (±0.03)

De la Tabla 2 se observa que los mayores valores de RC fueron obtenidos para las mezclas M1, M2 y M3 con resultados de 5.46 MPa, 5.86 MPa y 9.73 MPa, respectivamente. De acuerdo con la norma técnica obligatoria nicaragüense NTON 12 008-09: Fabricación de bloques de concreto, las mezclas M1 y M2 pueden ser utilizadas para la fabricación de bloque no estructural (BNE) y la mezcla M3 puede ser utilizada para la fabricación de bloque estructural tipo 2 (BE-2).

En la Figura 1 se presentan los efectos principales para las medias de las variables de estudio con respecto a la RC. Se puede observar que la variable %CCA-% cal es la de mayor influencia sobre la RC, seguido de la variable temperatura, y con un menor efecto (menor inclinación) la variable % de Na₂O utilizado para activar las propiedades cementosas. De la Figura 1 también se puede deducir que la mezcla óptima (MO) se corresponde con aquella formulada con 90% de CCA y 10% cal, con un 10% de Na₂O suministrado en forma de silicato de sodio y fraguada a 100 °C por 24 horas. De la Tabla 1 se observa que la mezcla M3 se corresponde con la MO, con una RC de 9.73 MPa a 28 días de curado.

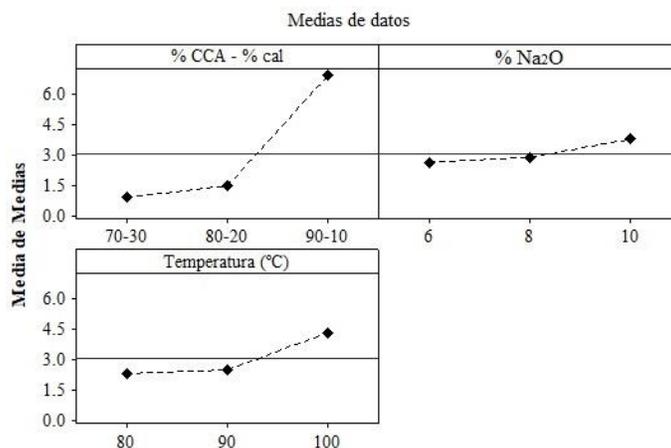


Figura 1. Efectos principales para las medias de las variables de estudio con respecto a RC.

Con los resultados de RC obtenidos para las 9 mezclas (ver Tabla 2) se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para un modelo lineal general utilizando los 3 factores de estudio (% CCA-% cal, % Na₂O y Temperatura de fraguado). Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis de Varianza para RC.

Fuente	GL	SC Sec.	% de Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
% CCA-% cal	2	67.666	82.77%	67.666	33.833	17.90	0.053
Na ₂ O %	2	2.440	2.98%	2.440	1.220	0.65	0.608
Temperatura	2	7.868	9.62%	7.868	3.934	2.08	0.324
Error	2	3.779	4.62%	3.779	1.890		
Total	8	81.753	100.00%				

El análisis anterior muestra el porcentaje de contribución para cada uno de los factores, siendo el % CCA-% cal el que mayor contribución aportó a los resultados de RC con un 82.77%, seguido por el factor temperatura de fraguado con un 9.62% y por último el factor % de Na₂O, el que menor contribución tuvo con un 2.98%. Los resultados obtenidos del ANDEVA se corresponden con los resultados de efectos principales mostrados en la Figura 1.

3.2 Espectroscopia infra roja por transformada de Fourier

En la Figura 2 se presenta el espectro infra rojo de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) sin ningún tratamiento químico (acondicionamiento previo de secado y tamizado) y de la pasta M3 de mayor RC (90% CCA-10% cal, 10% Na₂O, fraguada a 100 °C por 24 horas, con RC de 9.73 MPa a 28 días). En el espectro de la CCA se observan bandas alrededor de 3420 cm⁻¹, 1629 cm⁻¹, 1091 cm⁻¹, 795 cm⁻¹, 612 cm⁻¹ y 468 cm⁻¹. La banda alrededor de 3420 cm⁻¹ se origina por la vibración del grupo OH⁻ del agua fisisorbida, esta banda indica la presencia de humedad en la CCA. La banda alrededor de 1629 cm⁻¹ indica la presencia de agua químicamente enlazada. En dicho espectro destacan dos bandas relacionadas con el SiO₂, donde la más importante es la que está ubicada alrededor de 1091 cm⁻¹ que indica la existencia de tetrámeros de siloxanos cíclicos; la presencia de estos tetrámeros se confirma por la banda ubicada alrededor de 795 cm⁻¹. Al comparar el espectro infra rojo de la mezcla M3 con el de la CCA sin ningún tratamiento, se pueden observar

las mismas bandas en ambos espectros, sin embargo, en el espectro infra rojo de la mezcla M3 disminuye la intensidad de la banda ubicada alrededor de 1091 cm^{-1} y se desplaza ligeramente hacia valores menores de longitud de onda. Algo similar ocurre con la banda ubicada alrededor de 795 cm^{-1} , en el espectro infra rojo de la mezcla M3 disminuye ligeramente su intensidad y se desplaza ligeramente hacia valores menores de longitud de onda. Dicho desplazamiento y disminución de la intensidad de ambas bandas podría indicar que la activación alcalina de la CCA favorece la transformación de los siloxanos cíclicos (795 cm^{-1} y 1091 cm^{-1}) a tetrámeros de silicio unidos linealmente y a la conformación de una red tridimensional debido a la unión de los tetraedros de silicio (Tong et al., 2018), dando como resultado una nueva estructura de la red y una pasta con RC de 9.73 MPa a 28 días de curado.

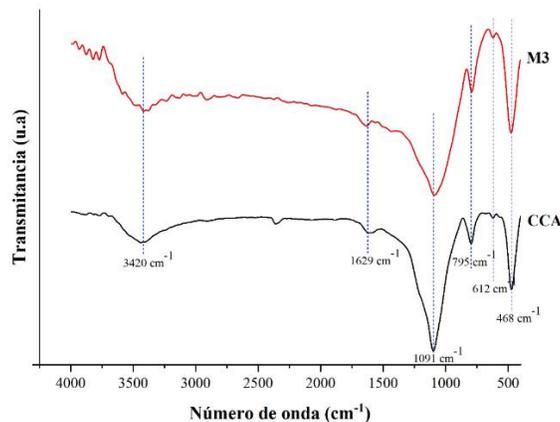


Figura 2. Espectro infra rojo de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) sin ningún tratamiento y de la pasta M3.

4. CONCLUSIONES

Se prepararon pastas de cemento variando el % de CCA y el % de cal (90-10, 80-20 y 70-30), el % de Na_2O utilizado como activador alcalino (6, 8 y 10 %) y la temperatura de fraguado (80, 90 y $100\text{ }^\circ\text{C}$). Se prepararon 9 pastas en total, obteniendo resultados significativos de RC entre 5 y 10 MPa a 28 días de curado. La mezcla óptima fue aquella formulada con 90% de CCA y 10% de cal, activada con 10% de Na_2O en forma de silicato de sodio y fraguada a $100\text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas. Del análisis de varianza se dedujo que el % de CCA y % de cal es la variable que afecta mayoritariamente los valores de RC obtenidos. Mediante espectroscopia infra roja se pudo confirmar que la activación alcalina con silicato de sodio tuvo un efecto sobre la red tridimensional de SiO_2 de la CCA, generando productos de reacción diferentes a la materia prima de partida. Los resultados de esta investigación demuestran la posibilidad de utilizar grandes volúmenes de CCA para producir materiales de construcción sustentables.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades de la Facultad de Ingeniería Química, de la Facultad de Tecnología de la Construcción, y a los técnicos de laboratorio de ambas Facultades, por el apoyo brindado para realizar esta investigación.

6. REFERENCIAS

- Allahverdi, A., Mehrpour, K., & Najafikani, E. (2008). Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzol in production of geopolymer cement. *Ceramics - Silikaty*.
- Arellano Aguilar, R., Burciaga Díaz, O., & Escalante García, J. I. (2010). Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. *Construction and Building Materials*.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.024>

Avila-López, U., Almanza-Robles, J. M., & Escalante-García, J. I. (2015). Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.085>

Bolsa Agroindustrial Upanic. (2021). *PRODUCCION AGROPECUARIA CICLO 2020/2021*.

Castaldelli, V. N., Moraes, J. C. B., Akasaki, J. L., Melges, J. L. P., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Payá, J., & Tashima, M. M. (2016). Study of the binary system fly ash/sugarcane bagasse ash (FA/SCBA) in SiO₂/K₂O alkali-activated binders. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.020>

Castaldelli, Vinícius N., Akasaki, J. L., Melges, J. L. P., Tashima, M. M., Soriano, L., Borrachero, M. V., Monzó, J., & Payá, J. (2013). Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma6083108>

De Soares, M. M. N. S., Garcia, D. C. S., Figueiredo, R. B., Aguilar, M. T. P., & Cetlin, P. R. (2016). Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.005>

Escalante-García, J. I., Espinoza-Perez, L. J., Gorokhovskiy, A., & Gomez-Zamorano, L. Y. (2009). Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.002>

Escalante García, J. I. (2002). Materiales alternativos al cemento Pórtland. *Avance y Perspectiva*.

Jordán, R., Riffo, L., & Prado, A. (2017). Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe: dinámicas y desafíos para el cambio estructural. *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL), October*, 427.

Menchaca-Ballinas, L. E., & Escalante-García, J. I. (2020). Limestone as aggregate and precursor in binders of waste glass activated by CaO and NaOH. *Construction and Building Materials*, 262, 120013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120013>

Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Akasaki, J. L., & Tashima, M. M. (2017). New inorganic binders containing ashes from agricultural wastes. In *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102001-2.00006-1>

Tong, K. T., Vinai, R., & Soutsos, M. N. (2018). Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders. *Journal of Cleaner Production*, 201, 272–286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.025>

Torres-Carrasco, M., Palomo, J. G., & Puertas, F. (2014). Sodium silicate solutions from dissolution of glasswastes. Statistical analysis. *Materiales de Construcción*. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.05213>

Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.071>