

# CUANTIFICACION DE LA RESISTENCIA MECANICA DE MORTEROS DE CEMENTO AL AÑADIR CENIZAS DE CASCARA DE ARROZ RICAS EN NANOPARTICULAS DE SILICE

## QUANTIFICATION OF THE MECHANICAL STRENGTH OF CEMENT MORTARS WHEN ADDED RICE HUSK ASH RICH IN SILICA NANOPARTICLES

**Camilo Orrabalis<sup>1</sup>, Argentino Ledezma<sup>1</sup>, Roberto Villalba<sup>1</sup>, Ricardo Martínez García<sup>1,2</sup>**

(1) Universidad Nacional de Formosa, Facultad de Recursos Naturales, Av. Gutnisky 3200, Formosa 3600 - Argentina

(2) Laboratorio de Sólidos Amorfos, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Paseo Colón 850, C1063ACV Buenos Aires - Argentina  
(e-mail: corrabalis@formosa.gov.ar)

### RESUMEN

Se obtuvieron cenizas ricas en nanopartículas amorfas de dióxido de silicio (conglomerados de diámetro promedio de 60 nm) a partir de la combustión controlada de la cáscara de arroz. La cáscara y la ceniza se utilizan en la preparación de morteros de cemento. Se estudió la morfología y estructura de la cáscara y de la ceniza, así como la influencia de su uso en las propiedades mecánicas de los morteros de cemento fabricados. En el análisis se presta especial atención a parámetros como la densidad de los morteros y su resistencia a la compresión. Los estudios se realizaron mediante microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, análisis termogravimétrico, y una máquina INSTRON para ensayos mecánicos.

### ABSTRACT

Rice husk ash formed by amorphous silica nanoparticles was obtained from rice husk using a controlled thermal decomposition (Conglomerates with an average diameter of 60 nm). The rice husk and the rice husk ash were used in the preparation of cement mortars. The morphology and structure of the rice husk and the rice husk ash, as well as the influence of those components on the mechanical properties of the concrete mortars, were studied. In the analysis, special attention is paid to parameters such as density of the concrete mortar and its resistance to compression. The studies were carried out by scanning electron microscopy, X-ray diffraction, thermogravimetric analysis, and a mechanical properties tests machine (INSTRON), were used for mechanical tests.

Palabras clave: combustión, nanopartículas de sílice, modificación de mortero, resistencia a compresión

Keywords: combustion, silica nanoparticles, mortar modification, compression resistance

## INTRODUCCION

La cáscara de arroz es un material lignocelulósico de amplia disponibilidad en Argentina. Como todo material lignocelulósico, las paredes celulares de la cáscara de arroz está compuesta por polisacáridos (celulosa, hemicelulosas), fenólicos (lignina) y compuestos minoritarios como los minerales (que tras una combustión forman las cenizas). Desde el punto de vista industrial, las fibras de las plantas lignocelulósicas tienen aplicaciones en la industria textil y del papel. En las últimas décadas las aplicaciones se han extendido a la industria energética y de nuevos materiales, como nanocelulosa y nanosílice (Ríos-Parada *et al.*, 2017; Mayooraan *et al.*, 2017; Blessen, 2018).

La cáscara de arroz es considerada un material de desecho, que en ocasiones se quema a cielo abierto causando un gran daño ecológico. Además, las cenizas de cáscara de arroz son ricas en nanopartículas de dióxido de silicio, las que pueden causar efectos nocivos en la salud al ser respiradas por animales y humanos. La presencia de un elevado contenido de dióxido de silicio en la composición de la ceniza de la cáscara de arroz es una importante diferencia con cenizas resultantes de otras fibras orgánicas. El porcentaje de sílice en la ceniza de la cáscara de arroz está entre un 90% (Anh-Tuan *et al.*, 2012; Treviño & Gómez de la Fuente, 2002) y un 95% (Ospina *et al.*, 2009; Blessen, 2018). Desde el punto de vista de la composición inorgánica, el porcentaje restante corresponde a trazas de diferentes óxidos, principalmente  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $P_2O_5$  (Ospina *et al.*, 2009; Blessen, 2018). El alto contenido de dióxido de silicio en su composición hace que la cáscara de arroz sea un material potencialmente importante para su uso en la industria de la construcción (Roselló *et al.*, 2017; Gill & Siddique, 2017; Pereira *et al.*, 2015). La producción de arroz en la Argentina es de aproximadamente 1.404.980 de toneladas al año, lo que origina unas 281.000 toneladas de cáscara de arroz como subproducto.

Las cenizas de la cáscara de arroz se pueden obtener mediante una combustión controlada para producir nanopartículas de dióxido de silicio que han sido usadas como puzolana (Jamil *et al.*, 2013; Vayghan *et al.*, 2013; Antiohos *et al.*, 2014; Cordeiro *et al.*, 2014; Roselló *et al.*, 2017). Estas nanopartículas de sílice reaccionan con la cal para formar silicatos de calcio hidratados (CHS). Al controlar la cantidad de CHS formados se puede controlar en cierto rango las propiedades mecánicas de los concretos obtenidos con estas adiciones. Por esta razón, se está investigando el uso de cenizas de cáscara de arroz como opción para la sustitución parcial de cemento en elementos constructivos como los morteros, los bloques de concreto, entre otros.

Existen reportes sobre el uso de la cáscara de arroz o sus derivados en la obtención de morteros y de hormigón, ya sea como sustituto de la arena o del cemento. Al respecto, se ha estudiado la influencia de tales adiciones en el cambio de ciertas propiedades mecánicas y morfológicas (Hui *et al.*, 2003; Águila & Sosa, 2008; Blessen, 2018). Sin embargo los estudios son escasos desde el punto de vista de la correlación entre las propiedades estructurales de las nanopartículas de sílice y las propiedades mecánicas de morteros de cemento con tales nanoestructuras en su composición. Por ello, en este trabajo se analiza el efecto de utilizar la cáscara de arroz sin tratar y la ceniza de cáscara de arroz rica en dióxido de silicio nanométrico como componentes para obtener mortero de cemento. Las cenizas de la cáscara de arroz se obtienen mediante una descomposición térmica que permite controlar el tamaño de las nanopartículas de sílice que la forman. Esto posibilita usar nanosílice amorfa como componente del mortero. Como parte del estudio, se analiza la morfología y estructura de la cáscara de arroz sin tratar y de la ceniza rica en nanosílice; así como la influencia del uso de estas componentes en las propiedades mecánicas de los morteros de concreto fabricados.

## MATERIALES Y METODOS

Para realizar este trabajo se utilizó cáscara de arroz de la variedad Epagri 108, cosecha año 2016, proveniente de la localidad Villa Escolar de la Provincia de Formosa, Argentina. El material fue provisto por el molino de arroz de la empresa Agrofortuc SRL situado en el Parque Industrial de la Ciudad de Formosa.

Como primer paso para el uso de la materia prima, la cáscara de arroz fue lavada con agitación usando agua destilada con una relación cáscara-agua de 1 a 4. La agitación se realizó con un agitador mecánico Fisatom 713

con pala tipo naval a una velocidad de 500rpm. El lavado se repitió cinco veces hasta que el agua de lavado fue incolora. Posteriormente, la cáscara se secó durante 24 horas en estufa a 100°C. Se realizó un análisis de varianza con prueba de Tukey ( $p > 0,05$ ) de la masa de la cáscara en función al número de lavados utilizando el procesador de datos Infostat®. El proceso de lavado presentó una variación global del  $8,23 \pm 0,69$  % respecto a la masa inicial, indicando que las muestras contienen impurezas solubles y/o partículas menos densas a la cascara.

Las cenizas de la cáscara de arroz se obtuvieron en una mufla Indef Mod 134 mediante una descomposición térmica controlada. El tratamiento térmico se realizó a 450°C durante 5 horas con una velocidad de calentamiento de 5°C/min. Posteriormente, las cenizas fueron porfirizadas y lavadas. El lavado de las cenizas se llevó a cabo para eliminar cationes e impurezas (Kalapathy *et al.*, 2000). Para ello, 100g de ceniza se colocó en 600ml de agua destilada, se agitó, y se llevó el pH a 1 añadiendo ácido clorhídrico (HCl). Este material se sometió a agitación mecánica durante 2 horas a una velocidad de 500rpm. Posteriormente, el sólido se lavó hasta pH neutro y se filtró, quedando la ceniza lista para añadir a los morteros de concreto. De la cáscara de arroz se obtuvo un  $24.77 \pm 1.02$  % de cenizas, de la cual alrededor del 90% es nanosílice ( $\text{SiO}_2$ ) y el resto carbono y trazas de minerales. Las cenizas, fueron obtenidas y seleccionadas para formular las mezclas con cemento y arena.

Para elaborar los morteros de concreto se utilizó cemento Loma Negra Portland Compuesto Granel CPC40 con adición de puzolana Filler/Calcáreo en la norma IRAM 50000:2017/50003:2017. Se utilizó arena del Río Paraná, de la localidad de Barranqueras, Provincia del Chaco, Argentina, suministrada por la empresa "Arenas del Litoral". Los materiales fueron agregados en proporciones en base seca. La mezcla se logró a 1000 rpm con el agitador mecánico Fisatom 713 provisto con una paleta tipo ancora. A la mezcla se le añadió plastificante Sikament®-90 E y cenizas de cáscara de arroz. La cantidad de agua se adicionó hasta lograr una manipulación correcta de la mezcla sin considerar constante la relación agua-cemento debido a la alta tasa de absorción de agua de las cenizas.

Para realizar las pruebas de las propiedades mecánicas de los morteros de concreto se confeccionaron moldes de probetas de PVC con una relación de esbeltez de 2 (base 2 cm y alto 8 cm). Como desmoldante se utilizó aceite mineral.

Se estudió la morfología de la cáscara de arroz y su ceniza mediante microscopia electrónica de barrido. Se utilizó un microscopio de barrido con emisión de campo ZeissSupra 40 operado a 3 kV. La pureza de fase y orden cristalino se estudió mediante un difractómetro de rayos-X de polvo Rigaku en geometría bragg Brentano con radiación de cobre en un rango entre  $10^\circ$  y  $100^\circ$ . La estabilidad térmica de la cáscara de arroz se estudió mediante análisis termogravimétrico usando un Shimadzu TGA-50. La curva termogravimétrica se registró entre 25°C y 800°C con una velocidad de barrido de 10°C/min bajo atmósfera inerte de nitrógeno.

Para calcular la densidad aparente de los morteros de concreto se utilizó el método de desplazamiento de volumen. Para ello, el volumen de cada probeta se determinó usando un calibre digital Lampard, y la masa de la probeta se determinó por gravimetría con una Balanza electrónica OHAUS modelo TA 302. La resistencia a la compresión de los morteros de concreto se midió en una máquina INSTRON modelo 5985 de tornillo a los 28 días de curado y a una temperatura ambiente controlada de 25 °C.

## RESULTADOS Y DISCUSION

En la figura 1 aparecen detalles de la cáscara de arroz lavada, seca, y lista para ser utilizada como materia prima para obtener cenizas ricas en sílice. Se aprecian rugosidades y conglomerados en la superficie de la cáscara. Las fibras están compuestas mayoritariamente por entre un 25 y 35% de celulosa, de un 18 a 20% de hemicelulosa, y alrededor de un 20% de lignina. Entre las fibras aparecen conglomerados de nanopartículas amorfas de sílice, siendo entre un 20 y un 22 % de la composición de la cáscara (Hincapié Rojas, 2017; Leiva *et al.*, 2007; Jamil *et al.*, 2013; Blessen, 2018). La sílice, que cumple principalmente funciones de refuerzo estructural, se adhiere a las

fibras de la cáscara de arroz mediante estructuras filiformes similares a micropelos existentes en la superficie de esta (Rodríguez *et al.*, 2012).

La figura 2a muestra el patrón de difracción de rayos X correspondiente a la cáscara de arroz. El patrón está formado por dos tipos de componentes, una amorfa y otra cristalina. A la componente amorfa aportan principalmente la hemicelulosa, la lignina y las nanopartículas de sílice. La componente cristalina se debe a la nanocelulosa presente en la cáscara. En la figura 2a se señalan los índices de Miller correspondientes a los principales picos asociados a la nanocelulosa que se pueden identificar en el patrón DRX de la cáscara de arroz. Tanto la nanocelulosa como el resto de las componentes orgánicas se eliminan durante los tratamientos térmicos para obtener la ceniza rica en sílice.

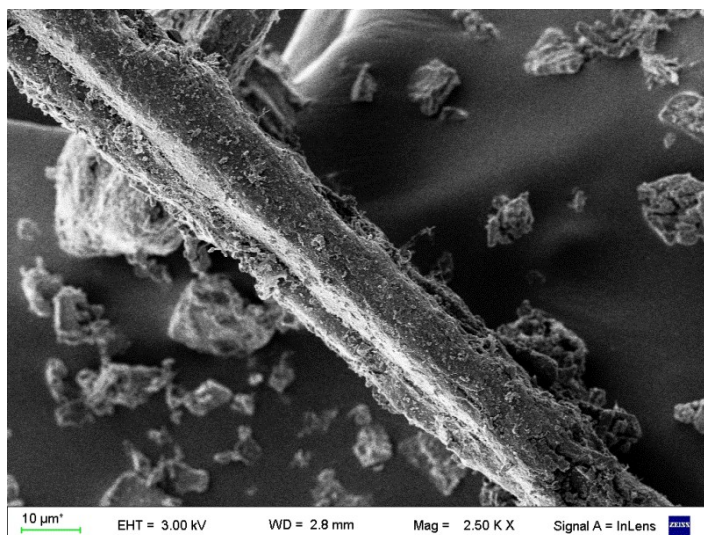


Fig. 1: Micrografía electrónica de barrido correspondiente a la cáscara de arroz utilizada como materia prima.

En la figura 2b aparece la curva termogravimétrica asociada a la descomposición térmica de la cáscara de arroz. Las características de esta curva están determinadas por la composición química, estructura, y grado de cristalinidad de la muestra (Fisher *et al.*, 2002). La cascara de arroz se compone de material orgánico e inorgánico.

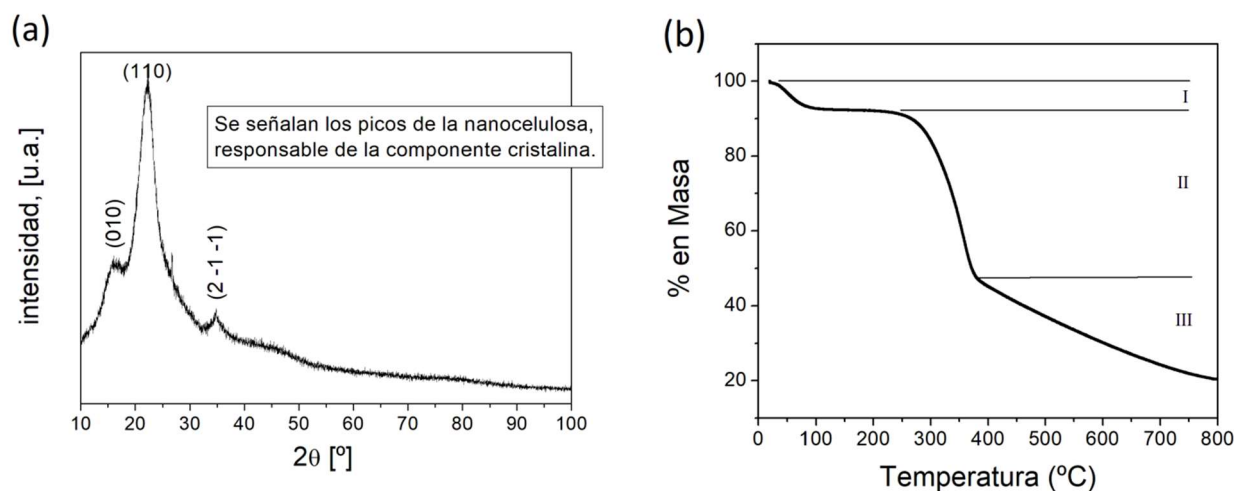


Fig. 2: Patrón de difracción de rayos X (a) y curva termogravimétrica (b) correspondientes a la cáscara de arroz.

La evolución de estas componentes en función de la temperatura se registra en diferentes partes de la curva, señaladas en la figura como zonas I, II y III. La deshidratación de la cáscara de arroz se registra en la zona I. La pérdida de masa asociada a la descomposición del material orgánico se registra en la zona II. La variación de la masa que se registra en la zona III se relaciona con cambios en la cantidad de carbono presente en la muestra. En ese rango de temperatura el carbono aparece como elemento acompañante del dióxido de silicio, componente principal de la muestra a partir de los 360°C. Resultados similares han sido reportados por otros autores. Ahiduzzaman y Sadrul Islam (2014), reportan que la mayor pérdida de masa (40 %), asociada a la descomposición orgánica, se produce a temperaturas menores a 400°C, con una media en los 360°C.

En la figura 3a aparece el patrón de difracción de rayos X correspondiente a las cenizas de cáscara de arroz obtenidas con un tratamiento térmico a 450°C. Se aprecia un patrón de DRX formado por una componente amorfa mayoritaria y fases secundarias cristalinas. La componente cristalina se manifiesta principalmente con un pico principal ubicado en los 26,5° en 2θ. Tal componente está asociada a la fase cuarzo alfa (quartz low) del SiO<sub>2</sub>. En menor proporción, también aparecen reflexiones correspondientes a la fase cristobalita alfa de SiO<sub>2</sub>. Las características de este patrón DRX evidencia que para una temperatura de 450°C el tratamiento térmico no aporta suficiente energía que permita el reordenamiento de las esferas de coordinación del SiO<sub>2</sub> y la formación de cristales de forma mayoritaria.

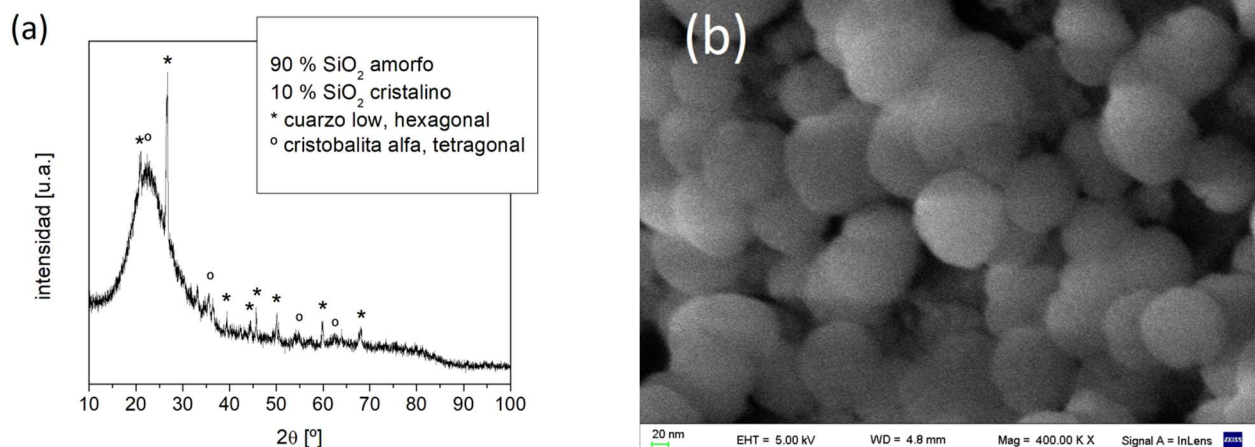


Fig. 3: Patrón de difracción de rayos X (a) y microscopía electrónica de barrido (b) correspondiente a las cenizas de cáscara de arroz.

El índice de cristalinidad ( $I_c$ ) de esta muestra se puede estimar usando el método de altura del pico,  $I_c = \frac{(I_{max} - I_{am})}{I_{max}} \cdot 100$  (Lecorre *et al.*, 2012; Segal *et al.*, 1959).  $I_c$  indica el grado de cristalinidad de la muestra,  $I_{max}$  la intensidad del pico más intenso de la contribución cristalina, y  $I_{am}$  la intensidad de difracción asociada a la componente amorfa. Usando este método se determina que las cenizas obtenidas a una temperatura de 450°C tiene un  $I_c$  aproximado de 10%. La baja cristalinidad de la muestra se corrobora mediante microscopía electrónica de barrido. En la figura 3b aparece la micrografía MEB de la ceniza de cáscara de arroz obtenida a 450°C. Se observa la presencia de conglomerados de nanopartículas amorfas de sílice homogéneamente distribuidos en el volumen. Estos conglomerados de partículas tienen un diámetro promedio de unos 60nm.

Las cenizas ricas en sílice se añadieron a la mezcla para obtener morteros de cemento con las formulaciones reportadas en la tabla 1. En dos de las formulaciones de las probetas no se sustituyó cemento por cenizas para tener un material testigo que permitiera la comparación de las propiedades con las probetas que si fueron dopadas con ceniza. En todas las formulaciones de las probetas que se prepararon con las cenizas se reemplazó cemento en un 20 %.

Tabla 1: Formulaciones de los morteros de cemento estudiados (n=5).

Materiales utilizados	F1	F2	F3	F4	F5
Cemento LN (%)	25	20	20	20	30
Arena Río Paraná (%)	75	75	75	70	66.5
Ceniza lavada con HCl (%)	0	0	5	0	0
Ceniza cruda (%)	0	5	0	10	0
Cáscara cruda (%)	0	0	0	0	3.5
Total	100	100	100	100	100
Relación agua/cemento	0.40	0.78	0.75	0.78	0.40
Plastificante (g $\approx$ 1.4%)	0.35 g	0.28 g	0.28 g	0.28 g	0.42 g
% Reemplazo cemento por cenizas	0%	20%	20%	20%	0%
% Reemplazo arena por cenizas	0%	0%	0%	7%	5%
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.22 $\pm$ 0.08 <sup>B</sup>	2.09 $\pm$ 0.04 <sup>AB</sup>	2.05 $\pm$ 0.05 <sup>A</sup>	1.97 $\pm$ 0.06 <sup>A</sup>	2.06 $\pm$ 0.12 <sup>A</sup>
Resistencia a la compresión (MPa)	32.94 $\pm$ 0.62 <sup>E</sup>	12.17 $\pm$ 0.31 <sup>B</sup>	14.65 $\pm$ 0.22 <sup>D</sup>	9.73 $\pm$ 0.13 <sup>A</sup>	13.81 $\pm$ 0.56 <sup>C</sup>

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

A todas las probetas se le determinó la densidad, y todas fueron sometidas a ensayos mecánicos de compresión hasta rotura. En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos. Comparado con la formulación estándar (F1), las probetas dopadas con cenizas ricas en sílice muestran una menor densidad que permite obtener un concreto más ligero. La formulación F2 es más "liviana" en un 5.86 %, la F3 en un 7.66 %, y la F4 en un 11.26 %. La formulación F5 tiene mayor contenido de cemento, sin embargo, la densidad baja en un 7,21 % respecto a F1 debido a la incorporación de cascarilla sin tratar. Estos resultados coinciden con lo reportado por otros autores en experimentos similares (Águila & Sosa, 2008; Anh-Tuan *et al.*, 2012). Según algunas literaturas, en morteros que tienen 28 días de curado y una relación agua cemento  $\approx$  0.45, se informan que los estándares rondan en un rango de 30 a 48 MPa, y que al sustituir por cenizas de cascara de arroz en un 20%, se alcanzan valores tales como 14, 23, 28, 30 MPa (Anh-Tuan *et al.*, 2012; Josephin *et al.*; 2017; Sandhu & Siddique, 2017; Salas *et al.*; 2009). A pesar de su ligereza, el mortero de concreto obtenido tiene suficiente resistencia, lo que lo hace apto para aplicaciones en las cuales no se requiera de una alta resistencia a la compresión. Se obtiene un concreto viable para fabricar componentes de construcción livianos y de uso no portante, como son los aislamientos térmicos y/o acústicos, y elementos de relleno (contrapiso).

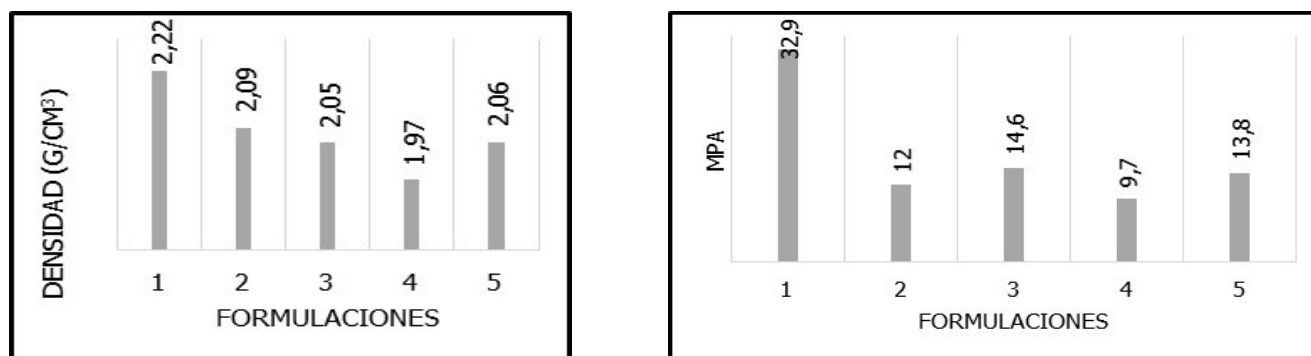


Fig. 4: Parámetros físicos evaluados en las probetas de mortero de cemento.

Algunos autores han reportado que la incorporación entre un 15 y 20 % de las cenizas de cáscara de arroz como puzolanas, han causado el efecto de aumentar la resistencia del concreto (Pereira *et al.*, 2015; Thomas, 2018; Jamil *et al.*, 2013). En nuestro caso no ha sido así. Se apreció que la tendencia general es a una disminución de la resistencia respecto a la formulación estándar. Es probable que esto se deba al pequeño tamaño de nanopartículas de sílice producto de la baja temperatura de obtención de las cenizas, a su alta capacidad de

absorción de agua ((255±6.43 %)), que llevó a duplicar la relación agua cemento para alcanzar la trabajabilidad del concreto. Al respecto se está evaluando nuevos diseños experimentales que permitan sortear las dificultades aquí reportadas.

## CONCLUSIONES

Se obtuvieron cenizas de cáscara de arroz ricas en nanopartículas amorfas de dióxido de silicio a partir de la combustión controlada de la cáscara. La cáscara de arroz sin tratar y las cenizas de la cáscara se utilizaron para preparar morteros de cemento. La ceniza obtenida está formada por conglomerados nanométricos de nanopartículas de sílice homogéneamente distribuidos. Al usar las cenizas como componente de la mezcla, se obtienen morteros de cemento ligeros con suficiente resistencia para ser usados en aplicaciones que no requieran de una alta resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión disminuye, respecto a la formulación estándar, en las probetas obtenidas con cenizas como componente del mortero. Esto puede deberse al pequeño tamaño de nanopartícula de sílice producto de la baja temperatura de obtención de las cenizas y a su alta tasa de absorción de agua.

## AGRADECIMIENTOS

A CONICET y la Agencia de Promoción Científica del MinCyT por el financiamiento otorgado a través del proyecto PICTO-UNaF #2014-0020. A la Secretaría de Políticas Universitarias por el financiamiento otorgado mediante el Proyecto de Vinculación e Innovación Tecnológica "Juan A. Sabato" SPU N° 44-142-230 RSPU N° 115/15.

## REFERENCIAS

1. Águila, I. & Sosa, M. (2008). Evaluación físico química de cenizas de cascarilla de arroz y su influencia en mezclas de mortero, como material puzolánico. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 23(4), 55–66.
2. Ahiduzzaman, M. & Sadrul Islam, A. (2015). Thermo-gravimetric and Kinetic Analysis of diferentes varieties of Rice Husk. *Procedia Engineering*, 105, 646-651.
3. Anh-Tuan, B.L., Chun-Tsun, C., Chao-Lung, H. & Mintar, F. (2012). Application of residual rice husk ash from Vietnam as a supplementary cementitious material in concrete. *Advanced Materials Research*, 347(353), 2829-2833.
4. Antiohos, S.K., Papadakis, V.G. & Tsimas, S. (2014). Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. *Cement and Concrete Research*, 61, 20-27.
5. Blessen, S.T. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3913–3923.
6. Cordeiro, L.P., Masuero, A.B. & Coitinho Dal Molin, D. (2014). Análise do potencial pozolânico da cinza de casca de arroz (CCA) através da técnica de Refinamento de Rietveld. *Revista Matéria*, 19(2), 150-158.
7. Fisher, T., Hajaligol, M., Waymack, B. & Kellogg, D. (2002). Pyrolysis behavior and kinetics of biomass derived materials. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 62, 331–349.
8. Gill, A. & Siddique, R. (2017). Strength and micro-structural properties of self-compacting concrete containing metakaolin and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 157, 51–64.
9. Hincapié Rojas, D.F. (2017). *Obtención y caracterización de nanopartículas de sílice a partir de la cascarilla de arroz para estudiar el efecto de su inclusión en las propiedades de las placas de fibrocemento*. Tesis presentada como requisito para optar al título de: Magister en Ciencias-Física. Universidad Nacional de Colombia. <http://bdigital.unal.edu.co/64134/1/1053818798.2017.pdf>. Fecha de consulta: 25/10/2018.

10. Hui, L., Hui-Gang, X., Jie, Y. & Jinping, O. (2003). Microstructure of cement mortar with nano particles. Composites part B. *Engineering*, 35, 185-189.
11. Jamil, M., Kaish, A., Raman, S.N. & Zain, M.F. (2013). Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system. *Construction and Building Materials*, 47, 588–593.
12. Josephin, A., Dhanalakshmi, J. & Ambedkar, B. (2016). Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production. *Construction and Building Materials*, 127, 353–362.
13. Kalapathy, U., Proctor, A. & Shultz, J. (2000). A simple method for production of pure silica from rice hull ash. *Bioresource Technology*, 73, 257-262.
14. Lecorre, D., Vahanian, E., Dufresne, A. & Bras, J. (2012). Enzymatic pretreatment for preparing starch nanofibrils. *Biomacromolecules*, 13, 132–137.
15. Leiva, P., Ciannamea, E., Ruseckaite, R. & Stefani, P.M. (2007). Medium-density particleboards from rice husks and soybean protein concentrate. *Journal of applied polymer science*, 106 (2), 1301-1306.
16. Mayooran, S., Ragavan, S. & Sathiparan N. (2017). Comparative study on open air burnt low- and high-carbon rice husk ash as partial cement replacement in cement block production. *J. of Building Engineering*, 13, 137–145.
17. Ospina, M., De Gutiérrez, R.M., Delvasto, S., Monzó, J., Borrachero, M.V. & Payá, J. (2009). Modificación de la morfología de la ceniza de cascarilla de arroz por molienda de altas energías y su efecto en las propiedades reológicas de pastas de cemento portland adicionadas. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 1 (2), 577-584.
18. Pereira, A.M., Silva, C.A., Quiroz, D.C., Morales, M.J.B., Melges, J.L.P., Tashima, M.M., *et al.* (2015). Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. *Revista Matéria*, 20 (1), 227– 238.
19. Ríos-Parada, V., Jiménez-Quero, V.G., Valdez-Tamez, P.L. & Montes-García, P. (2017). Characterization and use of an untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. *Construction and Building Materials*, 157, 83–95.
20. Rodríguez, Y.M., Salinas, L., Ríos, C. & Vargas, L. (2012). Adsorbentes a base de cascarilla de arroz en la retención de cromo de efluentes de la industria de curtiembres. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10 (1), 146-156.
21. Roselló, J., Soriano, L., Santamarina, M.P., Akasaki, J-L., Monzó, J. & Payá, J. (2017). Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems. *Industrial Crops and Products*, 103, 39–50.
22. Salas, A., Delvasto, S., Mejía de Gutierrez, R. & Lange, D. (2009). Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 39, 773–778.
23. Sandhu, R. & Siddique, R. (2017). Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 153, 751–764.
24. Segal, L., Creely, J.J., Martin, A.E. & Conrad, C.M. (1959). An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Textile Research Journal*, 29 (10), 786–794.
25. Thomas, B.S. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material. A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3913-3923.



26. Treviño, B.I. & Gómez de la Fuente, I. (2002). Obtención de fases del cemento utilizando desechos agrícolas e industriales. *Ciencia UANL*, 5 (2), 190-196.
27. Vayghan, A., Khaloo, A. & Rajabipour, F. (2013). The effects of a hydrochloric acid pre-treatment on the physicochemical properties and pozzolanic performance of rice husk ash. *Cement & Concrete Composites*, 39, 131–140.