

MORTEROS ALIGERADOS CON CASCARILLA DE ARROZ: DISEÑO DE MEZCLAS Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES

LIGHTWEIGHT MORTARS WITH RICE HUSK: MIX DESIGN AND PROPERTIES EVALUATION

TOMAS SERRANO

Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil – Universitat Politècnica de València (España). toserfal@cst.upv.es

M.VICTORIA BORRACHERO

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón ICITECH, Universitat Politècnica de València (España). vborrachero@cst.upv.es

JOSÉ M. MONZÓ

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón ICITECH, Universitat Politècnica de València (España). jmmonzo@cst.upv.es

JORDI PAYÀ

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón ICITECH, Universitat Politècnica de València (España). jjpaya@cst.upv.es

Recibido para revisar Marzo 28 de 2012, aceptado Junio 22 de 2012, versión final Julio 7 de 2012

RESUMEN: En el presente trabajo se analizó la posibilidad de utilizar la cascarilla de arroz con y sin pretratamientos, como una adición en la fabricación de morteros ligeros. Se estudiaron diversos pretratamientos de la cascarilla, tales como el lavado con agua destilada, baño en disolución ácida durante 24 horas, baño en disolución básica durante 24 h, así como combinaciones y variaciones de los anteriores pretratamientos. Se determinaron propiedades como la densidad, la resistencia a flexión y la resistencia a compresión de los morteros realizados. Finalmente se sometieron a análisis de microscopía electrónica tres de las muestras más representativas. Los resultados mostraron que se obtuvieron morteros de muy baja densidad y elevada porosidad que los convierten en candidatos para elaborar materiales de construcción para aislamiento térmico y acústico, pero no para fabricar elementos portantes debido a su baja resistencia mecánica. Se concluye que el tratamiento químico de la cascarilla con reactivos alcalinos y la adición de cloruro cálcico como acelerante del fraguado, son dos propuestas efectivas para la reutilización de estos residuos en morteros aligerados.

PALABRAS CLAVE: cascarilla de arroz, residuos agroindustriales, pretratamientos, morteros aligerados.

ABSTRACT: In this paper the possibility of using the rice husk with and without pretreatment was analyzed, as an addition in the preparation of lightweight mortars. Various pretreatments of rice husk, such as washing with distilled water, acid solution bath for 24 h, basic solution bath for 24 h, and combinations and variations of the above pretreatments have been studied. Properties such as density, flexural and compressive strength of mortars have been tested. Finally, three selected mortars were analyzed by scanning electron microscopy technique. The results showed that mortars with very low density and high porosity were obtained, which make them candidates to produce construction materials for thermal and acoustic insulation, but not for manufacturing bearing elements due to their low mechanical strength. Conclusion are that the chemical treatment of husks with alkaline reagents and the addition of calcium chloride as the curing accelerator are two effective methods for the reuse of this waste in lightweight mortar.

KEYWORDS: rice husk, agroindustrial waste, pretreatment, lightweight mortars

1. INTRODUCCIÓN

La cáscara o cascarrilla de arroz representa aproximadamente una quinta parte en peso del fruto recolectado, variando esta cantidad en función de las condiciones de cultivo y la variedad del arroz. Presenta un aspecto reticulado y sobre la parte superior de la lema suele extenderse una especie de filamentos, dependiendo de la variedad [1],[2].

Sus características físicas más significativas son las siguientes: peso específico 0,78 g/cm³; densidad aparente sin compactar 0,108 g/cm³; densidad aparente compactado 0,143 g/cm³ [3].

La composición orgánica de la cáscara de arroz es similar a la de la mayoría de las fibras orgánicas, conteniendo celulosa, hemicelulosa, lignina, compuestos nitrogenados, lípidos y ácidos orgánicos [1]. La celulosa y la hemicelulosa

constituyen la mayor parte de los hidratos de carbono presentes en la cáscara de arroz. La proporción de celulosa en la cáscara de arroz varía entre el 28% y el 49%, y la de hemicelulosa entre el 16% y el 22% [1]. Además de celulosa, podemos encontrar más polisacáridos en la cáscara de arroz: xylosa, arabinosa y galactosa [3]. La lignina da rigidez a la estructura de la cáscara y se concentra en sus paredes celulares. Su proporción varía entre el 19% y el 25%.

Los componentes inorgánicos generalmente se determinan en la ceniza de cáscara de arroz. La composición inorgánica de la ceniza difiere de las cenizas de otras fibras orgánicas, ya que tiene un elevado contenido en sílice [1], encontrándose en la ceniza resultante, un porcentaje superior al 90%, lo que la convierte en una fuente potencial de sílice [2]. Según otros autores, el porcentaje de SiO_2 en la ceniza puede alcanzar el 95%, correspondiendo el 5% restante a trazas de diferentes óxidos, principalmente K_2O [4].

Las principales impurezas que contiene esta sílice son: calcio, potasio, magnesio y manganeso, y como secundarias aluminio, hierro (10-20 ppm), boro y fósforo (1-40 ppm), generalmente en forma de óxidos [5]. Este elevado contenido de sílice amorfa que posee la ceniza de cáscara de arroz, hace que resulte interesante su utilización como adición puzolánica en el hormigón basado en cemento Pórtland, permitiendo un reemplazo parcial del cemento [4], y reduciendo la permeabilidad de los hormigones a tiempos medios y largos de curado [6].

Habitualmente la cascarilla de arroz es un producto agroindustrial que se utiliza como combustible por su valor calorífico (16.720 kJ/kg) [5,7], y de esta manera puede producir energía eléctrica [8] o simplemente calor. En el proceso de incineración, se generan a su vez humos contaminantes que contienen partículas peligrosas en suspensión para las personas [8]. También es posible reutilizar esta cascarilla como fuente de generación de hidrógeno y metanol por gasificación [9].

La utilización de la cáscara de arroz u otros residuos vegetales sin incinerar en la elaboración de hormigones y morteros no es muy habitual. De hecho la experiencia internacional consolidada en este campo es muy exigua, aunque variada.

Sirvan como ejemplo los residuos vegetales utilizados por otros autores tales como: serrín [10], [11]; corcho

[10], [12], [13]; cáscara de coco [10]; cáscara de maní [14]; fruto de las palmeras aceiteras [15], [16], [17], [18]; jugo de fique [19]; bagazo [20]; fibras de henequén [20]; fibras de pasto [21].

Las principales propiedades físicas de estos materiales que los hacen interesantes desde el punto de vista constructivo son: baja densidad, aislamiento acústico, abundancia y precio reducido.

Por el contrario, los principales inconvenientes que presenta el utilizar la cáscara de arroz como material de construcción son su porosidad, su higroscopía, y sus componentes orgánicos. Con objeto de reducir la materia orgánica presente en la cáscara de arroz, en especial los azúcares solubles en agua (retardadores del fraguado) se procedió a un pretratamiento consistente en un lavado y agitado con agua destilada. Se aplicaron también pretratamientos con ácido nítrico y con hidróxido sódico y posterior lavado con agua destilada a algunas muestras, a fin de que se pudiera hidrolizar la parte orgánica de la cáscara de arroz al contactar con el ácido o con la base; de ese modo, se eliminaría con el lavado, permitiendo que la interacción posterior entre la cáscara y el medio alcalino del cemento no aumente la concentración de azúcares en el medio acuoso e impida el fraguado del cemento.

Según Gatani et al. [14], el fraguado de mezclas de compuestos vegetales y cemento se retrasa con respecto a las mezclas de solo cemento, y esto ocurre probablemente debido a la presencia de algunos azúcares solubles en agua. La presencia de hemicelulosas tiene un efecto de retardo en el inicio de fraguado y pérdida de resistencia, debido a su solubilidad parcial en agua. Además, se reconoce el efecto retardador en el fraguado del cemento portland por la presencia de lignina. Por ese motivo se han de desarrollar métodos para: a) reducir el movimiento de agua en sus poros; b) resolver cuestiones propias de la dosificación (relación agua/cemento, características del curado y del mezclado); c) conseguir la mineralización de la cáscara para asegurar su durabilidad [3].

El objetivo del presente trabajo es la elaboración de morteros ligeros con cáscara de arroz, que presenten unos tiempos de fraguado y resistencias mecánicas aceptables. De estos materiales se estudiarán algunas de sus propiedades físicas principales (densidad, resistencia a compresión y flexión a los 28 días),

así como la microestructura y la naturaleza de los productos finales de las reacciones químicas que tienen lugar, mediante microscopía electrónica.

También se pretende analizar de forma más específica tanto el efecto de la cáscara de arroz en el fraguado y endurecimiento del mortero, como el minimizar dicho efecto a través de pre-tratamientos y del uso de aditivos químicos.

2. SECCIÓN EXPERIMENTAL

Para los morteros se ha utilizado cemento gris Pórtland tipo CEM I-52,5R según la Norma RC-08 y cuyos principales componentes son 63,69% CaO, 19,9% SiO₂, 5,38% Al₂O₃, 3,66% SO₃, 3,62% Fe₂O₃, 2,14% MgO, 1,17% K₂O, 0,10% Na₂O, 2,02% P.F., 0,95% R.I.. La arena fina silícea (AFA 80) fue de tamaño máximo de árido 1 mm y los porcentajes de arena retenidos en tamices fueron de: 39,93% entre 1 – 0,5 mm, 52,34% entre 0,5 – 0,16 mm, 5,43% entre 0,16 – 0,08 mm, 2,3% menor que 0,08 mm. El agua utilizada fue agua potable.

La cáscara de arroz molida (con un tamaño medio de partículas de 870 μm) fue suministrada por Agrocítrica (Valencia, España). En la Figura 1 se muestra la distribución granulométrica de la cáscara molida, y en la Figura 2 dos imágenes, una de la cáscara original y otra molida.

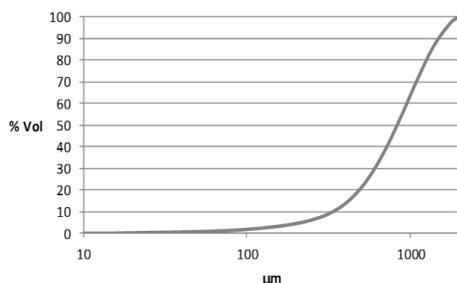


Figura 1. Granulometría de la cascarilla molida

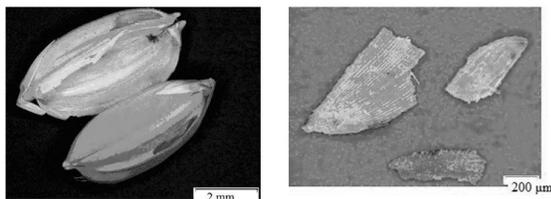


Figura 2. Cáscara de arroz. Izquierda, sin moler; derecha, molida

El tensoactivo utilizado fue Genapol PF 80 (EO-PO block polymer, 80% EO) y se añadió al 1% con respecto a cemento. El acelerante usado fue el cloruro cálcico anhidro

(CaCl₂). Para los pretratamientos de la cáscara de arroz se utilizó ácido nítrico (HNO₃), hidróxido sódico (NaOH) e hidróxido potásico (KOH). En las primeras muestras, el procedimiento de preparación de la cáscara de arroz molida consistió en un lavado con agua potable, y un posterior secado durante 24 h en una estufa a 105°C, para eliminar su humedad. Con esta cáscara de arroz tratada se elaboraron las series de probetas M1, M2, M3, M4 y M5.

El tratamiento con ácido y con base consistió en elaborar una disolución ácida mezclando 20 mL de HNO₃ (ácido nítrico) 1:2 y 980 mL de H₂O destilada, y una básica mezclando 100 mL de NaOH (hidróxido sódico) 1M y 900 mL de H₂O destilada. En ambas disoluciones se depositaron aproximadamente 100 g de cáscara de arroz. Esta suspensión permaneció 24 h en agitación mecánica. Transcurridas las 24 h se procedió a la decantación de la mezcla y al lavado de la cáscara de arroz con 1 L de agua destilada. Posteriormente se decantó el agua de lavado, y se filtró la misma, a fin de recoger la cáscara tratada. Por último, se secó la cáscara de arroz en una estufa a 105°C durante 24 h.

Para la determinación de las resistencias mecánicas en morteros de cemento, se utilizaron probetas de 4x4x16 cm. Dichas probetas se fabricaron en moldes de acero con capacidad para tres probetas por molde. La amasadora y el procedimiento de amasado que se utilizaron para los diferentes procesos de amasado, cumplen con la norma UNE-EN 196-1:1996 [22].

Se utilizó una mesa compactadora que cumplía los requisitos exigidos de la norma UNE 83-811.92 [23]. Los moldes se depositaron posteriormente en una cámara de curado, (20 ± 1°C y 100% de humedad relativa), con la precaución de cubrir la parte superior con un cristal, retirándose de allí a las 24 h para proceder al desmoldeado.

Uno de los aspectos más relevantes en la dosificación del mortero fue la determinación de la cantidad de agua necesaria. Para la preparación del mortero de cáscara de arroz-cemento, se estimó el nivel óptimo de contenido en agua, considerando los requerimientos de:

- Agua absorbida por la cáscara.
- Agua para obtener la plasticidad que permita el enmoldado.
- Correlación entre la resistencia de los morteros y la variable agua/cemento [3].

Los valores de resistencia a flexión se obtienen como valor promedio de tres ensayos realizados mediante

un ensayo de flexión a 3 puntos (sensibilidad de la prensa 2 kg), mientras que los valores de resistencia a compresión se obtienen como valor promedio de seis ensayos (sensibilidad de la prensa 10 kg). Para ambos ensayos, los equipos utilizados cumplen con UNE-EN 196-1:1996 [22]. Los valores de las densidades se obtuvieron como la media de tres probetas, calculada cada una de ellas como la masa (g) de la probeta, dividida por el volumen de la misma (256 cm³)

Tabla 1. Dosificaciones de los morteros fabricados y pretratamiento realizado en cada caso a la cáscara de arroz (cantidades en g respecto a 100 g de cemento)

Pretrat.	Clave Mx	Agua	Árido fino	Cáscara arroz	CaCl ₂
Agua	M1	145	150	150,0	
	M2	87,0	150	75,0	
	M3	87,0	150	37,5	
	M4	75,1	150	37,5	
	M5	60,0	150	37,5	
A/24h	M6	76,0	150	37,5	
B/24h	M7	76,0	150	37,5	
A24h/ B24h	M8	76,0	150	37,5	
	M9	76,0	150	37,5	1
A/24h	M10	76,0	150	37,5	1
B/24h	M11	76,0	150	37,5	1
B/24h	M12	76,0	150	37,5	2
	M13	76,0	150	37,5	3
A/24h	M14	60,0	150	37,5	
	M15	50,6	150	37,5	
B/72h	M16	76,0	150	37,5	
	M17	60,0	150	37,5	3
A 72h/ B 24h	M18	53,2	150	37,5	3
A 24h/ B 24h	M19 ¹	60,0	150	37,5	3
No	M20	40,0	150	0,0	3
B/24h	M21	50,0	150	33,3	3
	M22	40,0	150	25,0	3
	M23	48,1	150	25,0	3
	M24	44,0	150	25,0	3
	M25 ²	40,0	150	25,0	3

⁽¹⁾ Se mezcla la cáscara al 50% de cada tratamiento; ⁽²⁾ Se aumentó al doble la molaridad de la disolución básica; A:ácido; B: Base.

2.1. Dosificaciones de los morteros

En la Tabla 1 se muestran las dosificaciones de cada una de las muestras tomando como referencia la masa de cemento utilizada y los pretratamientos realizados a la cáscara de arroz.

Para el estudio de la morfología y composición de los productos formados, se utilizó la microscopía

electrónica de barrido (SEM). Se seleccionaron 3 muestras representativas, se recubrieron de oro, y se analizaron en el microscopio electrónico. Las principales características del equipo utilizado son las que se describen a continuación: modelo JEOL JSM6300 , voltaje aplicado de 20 kV, muestras recubiertas de oro.

De esta forma se pretende conocer la naturaleza física y química a nivel micrométrico y submicrométrico

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los primeros ensayos realizados con cáscara sin moler, demostraron que era inviable la incorporación de cantidades de cáscara relativamente importantes, ya que se producían demandas de agua muy altas y, consecuentemente, una segregación de la pasta de cemento. Este comportamiento es atribuido a la forma cóncava de la cáscara. Asimismo, otras pruebas preliminares demostraron que para obtener materiales muy ligeros (con densidades por debajo de 1,5 g/cm³) se requerían volúmenes de cáscara muy altos, lo que posteriormente imposibilitaba el proceso de fraguado. Para compensar la reducción de cáscara en los morteros, se adicionó un agente tensoactivo, que facilitaba la mezcla de los distintos componentes del mortero, ocluyendo burbujas de aire en el mismo

Se realizaron unos primeros ensayos con el uso de cáscara molida y de tensoactivo, al objeto de evaluar, por una parte, las dosificaciones que pudieran dar materiales correctamente compactados, y por otra parte, valorar el efecto que produce la cáscara sobre el fraguado y el proceso de endurecimiento de los morteros.

3.1. Propiedades de los morteros

3.1.1. Efecto del pretratamiento de la cáscara sobre el fraguado de los morteros.

Efecto del lavado con agua: Las muestras M1, M2, M3, M4 y M5 fueron dosificadas usando cáscara lavada con agua y secada posteriormente. En ningún caso se observó un mínimo fraguado que permitiera el desmoldeo a las 24 h. Se tomaron pequeñas porciones de las muestras y se introdujeron en un baño termostático, cuya temperatura era de 65° C, durante 5 días, para observar si habían fraguado transcurrido ese tiempo, hecho que no se produjo. Este resultado puso de

manifiesto que para esas dosificaciones, la interacción de la cáscara con el medio alcalino del cemento había provocado una hidrólisis de los carbohidratos de la cáscara, aumentando la concentración de azúcares en el medio acuoso e impidiendo el fraguado del cemento.

Efecto del lavado con ácido: De la misma forma, el lavado con ácido nítrico tampoco permitió que las mezclas fraguaran. Este hecho se puso de manifiesto en los morteros M6, M10, M14 y M15, que no fraguaron en las 48 h posteriores al amasado. Los resultados ponen de manifiesto, que incluso reduciendo el agua hasta alcanzar la relación agua/cemento 0,5 (mezcla M15) o con adición de una sustancia acelerante del fraguado, como es el cloruro cálcico (mezcla M10) no se puede compensar la influencia negativa de la cáscara en el proceso de fraguado, por los motivos expuestos anteriormente

Efecto del lavado con bases: Cuando se lava la cáscara con la disolución básica (con tratamiento combinado con ácido o no) sí se produce el fraguado de las mezclas y su endurecimiento. Esto es debido a que la hidrólisis que sufre la materia orgánica de la cáscara al contactar con la disolución básica, produce azúcares que son solubles al agua y se eliminan con el posterior lavado. El posterior contacto con el medio alcalino del cemento ya no produce estos azúcares y por tanto no se inhibe el fraguado. En la Tabla 2 se listan, para todas las probetas que pudieron ser desmoldeadas y ensayadas, los valores tanto de resistencia mecánica como de densidad aparente.

3.1.2. Efecto del pretratamiento sobre el mortero endurecido.

Podemos establecer ahora algunas comparaciones entre los resultados (densidad y resistencia a compresión) de las probetas realizadas, y evaluar de esta forma la influencia de algunas de las variables en los pretratamientos de la cáscara.

-El hecho de tratar la cáscara de arroz inicialmente con la disolución ácida y posteriormente con disolución básica, ha mejorado sustancialmente las resistencias a compresión de las muestras, con ligeros incrementos de la densidad del mortero (M7 vs M8, M11 vs M9). En este caso se ha mantenido la relación agua/cemento 0,76, y una relación cáscara/cemento de 0,375.

Tabla 2. Propiedades de los morteros endurecidos

Clave	Densidad	Resist. flexión	Resist. compresión
Mx	(g/cm ³)	(MPa)	(MPa)
M7	0,96	<0,2	0,87
M8	1,14	0,83	1,81
M9	1,06	0,81	1,99
M11	0,97	0,73	1,13
M12	0,96	0,70	1,38
M13	0,95	0,67	1,50
M16	1,02	0,73	1,56
M17	0,97	0,73	1,37
M18	0,97	0,73	1,29
M19	nd ⁽¹⁾	nd ⁽¹⁾	nd ⁽¹⁾
M20	1,28	2,24	5,37
M21	0,97	0,71	1,29
M22	1,14	1,37	2,64
M23	1,14	1,40	2,60
M24	1,21	1,85	4,13
M25	1,28	1,18	2,03

⁽¹⁾ n.d. No determinado por ausencia de fraguado

- Si se aumenta el tiempo de inmersión de cáscara de arroz en la disolución básica, pasando de 24 h a 72 h, se observa un gran aumento de la resistencia a compresión (ver resultados M7 vs M16). En este caso, la prolongación del tiempo de inmersión ha mejorado las características de la cáscara, reduciendo su efecto sobre el fraguado del cemento.
- Manteniendo el resto de parámetros de dosificación, en las mezclas M11, M12 y M13 se incrementa el contenido de cloruro cálcico (acelerante del fraguado del cemento) desde 1% al 3% con respecto al peso de cemento. En esta serie, se observa un ligero aumento de la resistencia mecánica.
- Si comparamos M18 con M21, o también M18 con M17, observamos la poca efectividad del tratamiento ácido, si la comparamos con la del tratamiento básico.
- La mezcla M19, de dosificación equivalente a la M17, pero con un 50% contenido de cáscara tratada con ácido, demuestra la gran influencia de la hidrólisis de los carbohidratos de la cáscara que no han sido eliminados en el tratamiento.
- La influencia de la cáscara de arroz en las prestaciones mecánicas se puede evaluar comparando la mezcla M20 (sin cáscara) con la M22 (en la que se mantienen el contenido en acelerante y la relación agua/cemento). Se observa que existen diferencias

significativas en la resistencia a compresión: mientras que para la mezcla M20 las resistencias a flexión y a compresión son 2,24 y 5,38 MPa respectivamente, cuando se introduce la cáscara se produce una reducción de las resistencias a 1,37 y 2,64 MPa respectivamente. Esto significa que el efecto del aireante es importante en el aligeramiento del mortero, y que la cáscara afecta de forma negativa al desarrollo de resistencias mecánicas (a pesar de estar lavada en medio básico y generar solamente una pequeña disminución de la densidad del composite). Aparentemente, la adherencia de la pasta de cemento al árido ligero (cáscara) no es demasiado buena y ello conlleva una disminución de la resistencia mecánica a compresión y a flexión.

- El efecto de la reducción de agua, y por tanto de la relación agua/cemento (entre paréntesis), se puede analizar si comparamos M23 (0,48), M24 (0,44) y M22 (0,40). Según se desprende de la comparación, el exceso de agua reduce la resistencia de las probetas, pero cuando reducimos demasiado la cantidad de la misma, las probetas también son de menor resistencia, probablemente debido a una baja compactación (menor densidad).
- La comparación de M22 (tratamiento de la cáscara con 100 mL de NaOH 1M y 900 mL de H₂O destilada) y M25 (tratamiento con 200 mL de NaOH 1M y 800 mL de H₂O destilada), para estudiar la influencia de la concentración de la disolución básica utilizada, nos lleva a la conclusión de que una mayor concentración en la disolución del tratamiento no conduce a una mejora de las prestaciones mecánicas, ni a la reducción de la densidad.

3.2. Análisis microestructural

Se han seleccionado tres morteros M8 (tratamiento ácido/básico de la cáscara, con adición de un 1% de CaCl₂), M13 (tratamiento básico de la cáscara y adición de un 3% de CaCl₂) y M24 (mismo tratamiento anterior, con adición de 3% de CaCl₂, pero distinta dosificación de cáscara en el mortero), con el objeto de estudiar la microestructura y los productos de hidratación generados. Las micrografías MEB se muestran en las Figuras 3, 4 y 5, respectivamente.

Las imágenes 3a y 3b corresponden a un detalle general de la muestra M8. Se observa una elevada porosidad, debida a la adición del agente tensoactivo,

que ha generado burbujas esféricas con superficies internas lisas. En ellas se aprecia el tamaño y forma de los macroporos, bastante cerrados y de tamaño inferior a 1 mm. De acuerdo con Akhtar y Evans [24], al ser los poros más pequeños que 4 mm, pudiera tratarse de materiales con gran resistividad térmica, ya que la presencia de estos poros hace que se reduzca la transmisión de calor por convección en los mismos.

En la Figura 3c se muestran cristales de etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado) en forma típica de aguja creciendo en las cercanías de un macroporo. En la Figura 3d se observan cristales de portlandita (hidróxido de calcio Ca(OH)₂) que crecen a modo de lámina debido a la elevada porosidad de la muestra. Estos cristales están rodeados de agujas de etringita.

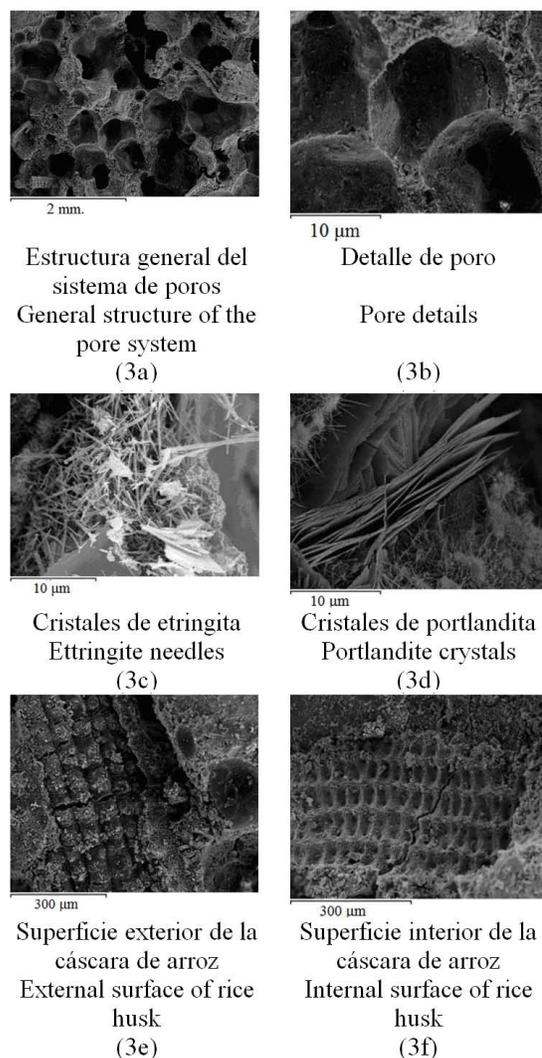


Figura 3. Micrografías MEB del mortero M8

La Figura 3e muestra la parte exterior de un fragmento de cáscara de arroz, rodeada con productos de hidratación, con fisuras debidas a la molienda o el tratamiento químico [12]. La Figura 3f muestra la parte interna de la cáscara donde se observan microfisuras y algunos productos de hidratación, básicamente silicatos cálcicos hidratados (SCH).

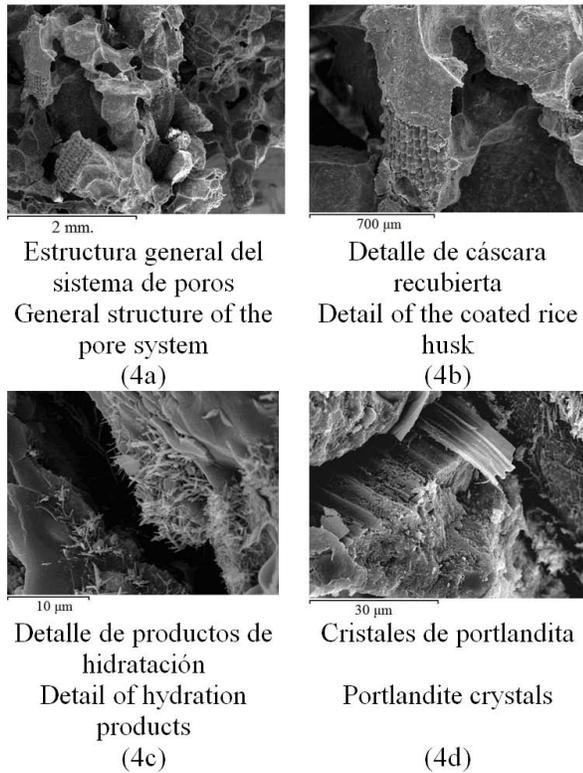


Figura 4. Micrografías MEB del mortero M13

En la Figura 4 se muestran micrografías para el composite M13. En la micrografía 4a se advierte la gran cantidad de poros y huecos que posee la muestra. Se identifican claramente varios fragmentos de cáscara de arroz, observándose que uno de ellos tiene aproximadamente la mitad de su superficie cubierta de productos de hidratación (ver detalle en micrografía 4b). Se concluye por tanto que la cáscara se rodea de pasta de cemento, aunque en algunos puntos se desprende fácilmente, por la deficiente adherencia entre estos dos materiales.

Las micrografías 4c y 4d muestran sendas ampliaciones de los productos que están adheridos a la cáscara de arroz. En la primera de ellas se observan cristales similares a la etringita creciendo en los huecos y en

la segunda se ve la parte interior de la cáscara de arroz, junto con algunos productos de hidratación, básicamente portlandita.

Se ha realizado análisis de fluorescencia de rayos X, donde se observa la presencia de cloro: probablemente por la formación de sal de Friedel (cloroaluminato cálcico hidratado) como consecuencia de la adición de cloruro cálcico.

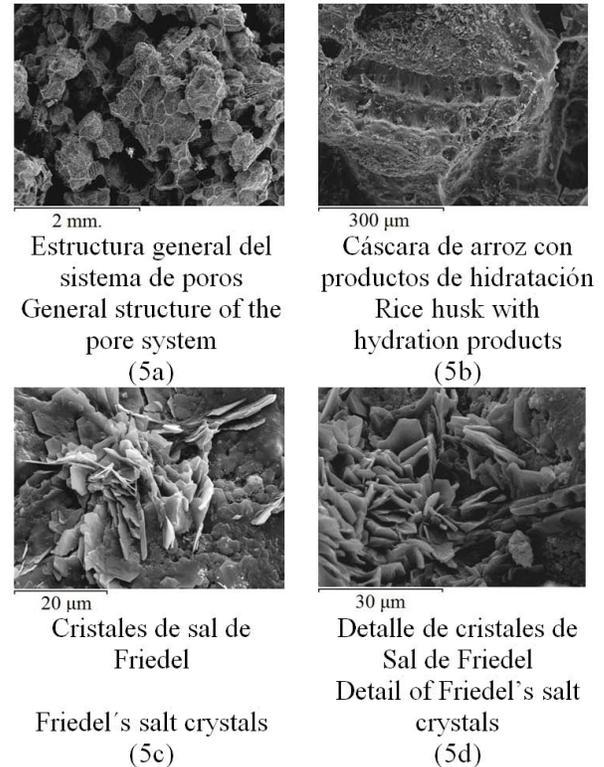


Figura 5. Micrografías MEB del mortero M24

Por último, en la Figura 5, que corresponde al composite M24, indicar también la presencia de una gran cantidad de poros (Figura 5a), a pesar de que en esta mezcla la relación agua/cemento era de 0,44. Ello significa que la presencia de poros estará provocada básicamente por el tensoactivo. Otro indicio importante, que se puede relacionar con las mejores prestaciones mecánicas de este composite, es que la mayor parte de las partículas de cascarilla están recubiertas de pasta de cemento. Aparentemente, la reducción en la relación agua/cemento mejora la adherencia pasta-cáscara. Muchas partículas (como la mostrada en la micrografía 5b) están rodeadas de cantidades importantes de productos de hidratación del cemento adheridos a las partículas. En esta mezcla M24, que tiene cloruro cálcico en la

composición, se advierte (ver micrografías 5c y 5d) la presencia de sal de Friedel ($C_3AH_12CaCl_2$), formada gracias a la presencia de los iones cloruro (provenientes del $CaCl_2$) que reaccionan con el aluminato tricálcico del cemento (C_3A).

4. CONCLUSIONES

Debido a la morfología y absorción de agua de la cascarilla de arroz, la elaboración de composites con dicho residuo requiere la adición a la mezcla de sustancias tensoactivas. La oclusión de aire, además de aligerar la mezcla, permite la mejora en la trabajabilidad y la colocación en moldes.

La cáscara de arroz tan sólo tratada con una disolución ácida, inhibe las reacciones de hidratación del cemento, por lo que no se produce el fraguado del mismo. Sin embargo, la cáscara de arroz tratada con una disolución básica permite las reacciones de hidratación del cemento, su fraguado y posterior endurecimiento.

Se han obtenido morteros ligeros con densidades en el intervalo de 1,1-1,3 g/cm³, que presentan resistencias mecánicas entre 2 y 4 MPa. Como cabía esperar, los materiales resultantes no presentan las propiedades mecánicas de los morteros y hormigones tradicionales, sin embargo son interesantes para ser aplicados en componentes de construcción livianos y de uso no portante (aislamientos térmicos/acústicos o rellenos)

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universitat Politècnica de València por la financiación del proyecto "Diseño de sistemas de combustión a partir de residuos agrícolas para uso en países en vías de desarrollo, optimizando la producción energética y las propiedades puzolánicas de la ceniza obtenida en la combustión para su uso en materiales de construcción no convencionales" (Programa ADSIDEO-COOPERACIÓN 2010)

A la Agencia Española de Cooperación al Desarrollo (AECID) por la financiación del proyecto "Utilización de ceniza de cáscara de arroz en la elaboración de materiales de construcción no convencionales para viviendas de bajo coste económico y ecológico: asesoramiento y capacitación a microempresarios" (AP/035235/11)

REFERENCIAS

- [1] Ordoñez, L. M., Reutilización de la Ceniza de Cáscara de Arroz como material de Construcción: Valoración y Optimización de sus Propiedades Puzolánicas [PhD Thesis]. Universidad Politécnica de Valencia, 2007.
- [2] Treviño, B., Gómez, I., Obtención de fases del cemento utilizando desechos agrícolas e industriales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. Vol. V, No. 2, pp. 190-196, abril 2002.
- [3] González De La Cotera, M., Morteros ligeros de cáscara de arroz. IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Lima, Perú, 1-10, Noviembre 1982.
- [4] Ospina, M., De Gutiérrez, R.M., Delvasto, S., Monzó, J., Borrachero, M.V., Payá, J., 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, vol. S1(2), pp. 577-584, 2009.
- [5] Ahumada, L.M., Rodríguez-Páez, J.E., Uso del SiO₂ obtenido de la cascarilla de arroz en la síntesis de silicato de calcio, Revista Acad. Coloma. Cien. 30 (117), pp. 581-594, 2006.
- [6] Malhotra, V.M., Metha, P.K., Pozzolanic and cementitious materials, Gordon and Breach Publishers, Ottawa, 1996.
- [7] Gómez, C., Lopera, E., Evaluación experimental de las velocidades mínimas de fluidización para mezclas de carbón ripio y residuos agrícolas colombianos, Dyna, Vol. 78, No 169, pp. 105-112, 2011.
- [8] Ferreira-Leitao, V., Fortes Gottschalh, L.M., Ferrara, M.A., Lima Nepomuceno, A., Correa Molinari, H.B., et al. Biomasa residues in Brazil: availab sility and potencial uses, Waste and Biomass Valorization, Vol.1, No. 1, pp. 65-76, 2010.
- [9] Muñoz, J., Posada, A., Simulación de la producción de hidrógeno y metanol a partir de la gasificación de cascarilla de arroz con vapor, Dyna, Vol.78, No 165, pp. 122-131, 2011.
- [10] Ramaswamy, S.D., Murthy, C.K., Nagaraj, T.S., Use of waste materials and industrial by-products in concrete construction, Concrete Technology and Design: New Concrete Materials, Vol. 1, pp. 137-169, 1983.
- [11] Stahl, D.C., Skoraczewski, G., ARENA, P., Stempski, B., Lightweight Concrete Masonry with Recycled Wood

- Aggregate, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, pp. 116-121, 2002.
- [12] Karade, S.R., Irle, M., Maher, K., Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. *Holz als Roh und Werkstoff*, 64, pp. 281-286, 2006.
- [13] González, B., Llamas, B., Juan, A., Guerra, I., Ensayos de hormigones fabricados con polvo de corcho, *Materiales de Construcción*, Vol. 57, pp. 286, 83-90, abril-junio 2007.
- [14] Gatani, M., Argüello, R., Sesín, S., Materiales compuestos de cáscara de maní y cemento. Influencia de diferentes tratamientos químicos sobre las propiedades mecánicas, *Materiales de Construcción*, Vol. 60, 298, pp. 137-147, abril-junio 2010.
- [15] Basri, H.B., Mannan, M.A., Zain, M.F.M., Concrete using waste oil palm shell as aggregate, *Cement and Concrete Research*, 29, pp. 619-622, 1999.
- [16] Mannan, M.A., Ganapathy, C., Engineering properties of concrete with oil palm shell as coarse aggregate, *Construction and Building Materials*, 16, pp. 29-34, 2002.
- [17] Mannan, M.A., Ganapathy, C., Long-term strengths of concrete with oil palm shell as coarse aggregate, *Cement and Concrete Research*, 31, pp. 1319-1321, 2001.
- [18] Mannan, M.A., Alexander, J., Ganapathy, C., Quality improvement of oil palm shell as coarse aggregate in lightweight concrete, *Building and Environment*, 41, pp. 1239-1242, 2006.
- [19] Ochoa, J.C., Jaramillo, L., Uso del jugo de fique como aditivo orgánico en el hormigón, *Scientia Et Técnica*, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, Vol. XIII, No. 036, pp. 455-459, 2007.
- [20] Acevedo, J., Uso de las fibras orgánicas en paneles ligeros, II Simposio Aprovechamiento de Residuos Agro-Industriales como Fuente Sostenible de Materiales de Construcción, Valencia, España, Noviembre 2010.
- [21] Trujillo, K., Las fibras de pasto como material para la construcción de elementos arquitectónicos interiores y exteriores no estructurales, II Simposio Aprovechamiento de Residuos Agro-Industriales como Fuente Sostenible de Materiales de Construcción, Valencia, España, Noviembre 2010.
- [22] UNE-EN 196-1, Método de Ensayos de Cemento. Parte I: Determinación de las resistencias mecánicas, 1996.
- [23] UNE 83-811-92, Método de Ensayos de Morteros Frescos. Determinación de la consistencia. Mesa de Sacudidas, 1992.
- [24] Akhtar, F.K., Evans, J.R.G., High porosity (>90%) cementitious foams, *Cement and Concrete Research*, 40, pp. 352-358, 2010.