

CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ

G. Giaccio^{1,2,3}; M. C., Torrijos^{1,3,4} y R., Zerbino^{1,3,4}

¹ LEMIT. ggiaccio@ing.unlp.edu.ar

² CICPBA

³ Facultad de Ingeniería. UNLP

⁴ CONICET

RESUMEN

Tanto el uso de adiciones minerales como el aprovechamiento y disposición de residuos en materiales a base de cemento Pórtland constituyen líneas de investigación desarrolladas por años en el LEMIT-CIC. Este artículo trata sobre la incorporación de cenizas de cáscara de arroz (CCA) en hormigones de cemento Pórtland. En particular se presentan los resultados salientes de dos proyectos de cooperación sobre el tema. El primero de ellos junto con la Universidad de la República (UDELAR) de Montevideo, Uruguay, sobre el uso de CCA en hormigones convencionales y de alta resistencia, y el segundo junto con la UDELAR y el GEPECON de la Universidad Federal de Santa María, Brasil, sobre el aprovechamiento de la CCA en estado natural, para uso en hormigón estructural de resistencia convencional. Los resultados obtenidos permiten apreciar las posibilidades de este residuo. Las CCA producidas bajo combustión controlada representan una puzolana altamente reactiva que pueden incorporarse al hormigón con sus consecuentes ventajas técnicas y ambientales. Bajo quema no controlada se produce una puzolana de menor calidad, denominada CCA residual, que puede optimizarse mediante molienda aunque esto implica un costo no despreciable. Adoptando una adecuada secuencia de mezclado durante la elaboración del hormigón se puede reducir el tamaño de partículas de la CCA residual y conseguir resultados comparables con los de una CCA residual optimizada. Las posibilidades de aprovechamiento de la CCA residual dependen del equipamiento disponible para elaborar el hormigón. La incorporación de CCA puede resultar beneficiosa en ambientes agresivos, por ejemplo con sulfatos, pero es necesario alertar sobre la necesidad de verificar la durabilidad del material para las condiciones de exposición en cada aplicación.

INTRODUCCIÓN

Numerosos antecedentes de los que da cuenta este libro ponen en relieve el interés que reviste el uso de adiciones en el hormigón y otros materiales con cemento Pórtland ya sea como parte del cemento comercializado como en forma separada. Entre las principales motivaciones aparecen no sólo el minimizar el consumo de clínker sino atender a demandas crecientes de cemento para el desarrollo de los países considerando que el hormigón es el material de construcción de mayor consumo en el mundo. Asimismo, es reconocido que, junto a los beneficios ambientales, existen ventajas técnicas y económicas que pueden ser muy significativas. Es evidente que la decisión sobre la conveniencia del uso en el hormigón de una y otra adición mineral está vinculada a la disponibilidad en volúmenes y geográfica de la misma.

Entre las adiciones que podrían catalogarse como no tradicionales aparecen la ceniza de la cáscara de arroz (CCA), que representa una alternativa a considerar ya que, según sus condiciones de obtención y procesamiento, puede ser empleada tanto como una adición activa de muy alta calidad (comparable al humo de sílice) hasta como un material fino no tan efectivo pero que puede ser incorporado para mezclas de baja resistencia o sencillamente ser dispuesta para minimizar problemas de contaminación (asimilable a la disposición de un residuo).

Tanto el uso de adiciones minerales como el aprovechamiento y disposición de residuos en materiales a base de cemento Pórtland constituyen líneas de investigación que ha desarrollado el LEMIT-CIC desde hace muchos años. Este artículo trata sobre el

aprovechamiento de las CCA como material puzolánico en hormigones de cemento Pórtland. En primer lugar se describen algunos antecedentes y luego se presentan los resultados salientes de dos proyectos de cooperación sobre el tema. El primero de ellos realizado junto con la Universidad de la República (UDELAR) de Montevideo, Uruguay puso énfasis en la contribución de las CCA para la obtención de hormigones de altas prestaciones y analiza en particular las propiedades mecánicas y de fractura en hormigones de alta resistencia. En el segundo y más extenso proyecto donde también participó la UDELAR pero fue referenciado por el Centro de Tecnología, Departamento de Estruturas e Construção Civil (GEPECON/UFSM) de la Universidad Federal de Santa María, Brasil, como parte de un Programa PROSUL, "Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz "in natura", sem beneficiamento", y atiende al aprovechamiento de significativos volúmenes de cenizas resultantes de la producción de arroz en el sur de Brasil, Uruguay y la Mesopotamia de Argentina. Una alternativa de uso de estas cenizas sin procesamiento especial, en estado natural, pueden ser los hormigones estructurales, con niveles de resistencia convencionales, por lo que pueden adquirir un valor estratégico desde el punto de vista técnico-económico y social en zonas rurales.

ALGUNOS ANTECEDENTES

El arroz representa uno de los cereales con mayor contenido de silicatos, principalmente su cáscara. Al ser quemado, alrededor del 20% de la cáscara se transforma en ceniza con una estructura celular porosa, alta superficie

específica (50 a 100 m²/g) y alto contenido de sílice. La composición química de la ceniza de arroz depende de la temperatura y tiempo de ignición pero las variaciones de los elementos son poco significativas.

Se ha demostrado que las CCA producidas bajo combustión controlada constituyen un material puzolánico altamente reactivo (Mehta 1994). Así como ocurre con otras adiciones minerales como las cenizas volantes o la microsílíce, las CCA pueden ser incorporadas al hormigón con sus consecuentes ventajas técnicas y ambientales.

Una CCA de gran actividad puzolánica se puede producir mediante una combustión controlada y donde la sílice se mantiene en forma no cristalina y con una estructura celular porosa. Esta sílice puede reaccionar en materiales con cemento Pórtland, en presencia de agua y de hidróxido de calcio formando silicatos hidratados secundarios. Como otras adiciones muy reactivas combinan a la formación de S-C-H secundario efectos físicos que dan lugar a un refinamiento de la estructura y actúan como puntos de nucleación de los productos de hidratación y restringen el crecimiento de los cristales generados durante la hidratación. Esto da lugar a incrementos en las propiedades mecánicas y disminuciones en la permeabilidad. La mayoría de los investigadores confirman que la temperatura de combustión es un punto crítico en la producción de formas amorfas reactivas. Asimismo la velocidad de reacción puzolánica también está influenciada por las características físicas, particularmente su finura. Diversos trabajos mostraron que la sustitución de 10% de cemento por CCA da lugar a una excelente performance comparado con un hormigón de referencia (James and Rao 1986, Malhotra and Mehta 1996, Mehta, 1992, Zhang et al 1996, Zhang and Malhotra 1996).

Sin embargo, en general la quema se realiza en calderas sin control de temperatura, lo que da lugar a una ceniza en la que parte de la microestructura es cristalina y no amorfa, como sería deseable para favorecer la actividad puzolánica. La CCA proveniente de la combustión no controlada suele contener grandes proporciones de minerales silíceos no-reactivos como cristobalita y tridimita, y requiere ser molida hasta tamaño de partículas muy finas para desarrollar actividad puzolánica.

En consecuencia bajo condiciones de quema no controlada se produce una puzolana de menor calidad, denominada CCA residual. Este material puede optimizarse mediante una molienda apropiada pero, como es fácil vislumbrar, la molienda implica un costo no despreciable.

RELEVANCIA DEL PROBLEMA EN LA REGIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS CCA

La agricultura constituye uno de los pilares de la economía de Brasil, Argentina y Uruguay. Para dar una idea de la relevancia del problema cabe indicar que gran parte de la producción de arroz en el Mercosur corresponde a una zona geográfica bien definida: la región que comprende el estado de Rio Grande do Sul, Uruguay y la Mesopotamia Argentina, con un área cercana a 660.000 km². Entre los tres países se producen unos 15 millones de toneladas de arroz por año, que representa aproximadamente el 2% de la producción mundial y el 60% de la de América del Sur (<http://www.fao.org>). En Argentina cerca del 80% de la

producción corresponde a las provincias de Entre Ríos y Corrientes. Cada tonelada de arroz da lugar a 200 kg de cáscara que si se quema por completo generan 40 kg de CCA.

La CCA es un material silíceo que debe ser depositado o utilizado para evitar la contaminación. Un cálculo grosero permite estimar que se podría generar una cantidad de cenizas cercana a las 600.000 t/año en la región, que de no ser planificada su disposición se traduciría en un grave problema para el medio ambiente.

En los estudios realizados se emplearon muestras de CCA residual de la región, siempre obtenidas bajo condiciones de combustión no controlada.

En el primero de ellos realizado junto con la Universidad de la República (UDELAR) de Montevideo, se utilizaron cenizas provenientes de plantas industriales en Uruguay donde se utiliza la cáscara como combustible; en este caso la CCA tuvo una finura de 28800 m²/kg, medida a través de adsorción de nitrógeno (Rodríguez de Sensale 2006, Giaccio et al 2007).

En el segundo y más extenso proyecto coordinado por el GEPECON/UFSM, se obtuvieron muestras de CCA residual de la zona de Santa María, Brasil, que luego de ser cuidadosamente seleccionadas y homogeneizadas, fueron preparadas en dos condiciones:

- CCA molida (CCAM): luego del secado se realizó un proceso de molienda para su optimización mediante un molino a bolas. A modo de referencia la superficie específica Blaine de esta ceniza fue del orden de 750 m²/kg.
- CCA natural (CCAN): la ceniza fue solamente secada para facilitar la homogeneización, envasado y posterior transporte. Para usar la CCAN, se propuso su mejora a partir de la molienda junto con los agregados durante el mezclado en la hormigonera.

En la Tabla 1 se muestran algunas características de las cenizas empleadas en el segundo proyecto. En el caso de la CCAN, se comparan algunas de sus propiedades iniciales con las que resultan luego de 10 minutos de mezclado en una hormigonera de 150 litros de capacidad en forma conjunta con el agregado grueso. Para realizar este proceso se empleó una relación 1 a 15 en peso entre CCAN y agregados, típica de las proporciones a utilizar en el hormigón. Es posible observar que se produce una molienda durante el mezclado que reduce significativamente los retenidos en los tamices # 50 y 100.

En la Fig. 1 se observa el aspecto de la ceniza en su estado natural y el de la ceniza molida; también se pueden ver los acopios de cáscara y de la ceniza en estado natural durante el proceso de homogenización para el estudio experimental. Por su parte en la Fig. 2 se muestra la CCA en estado natural y luego de ser mezclada junto con el agregado durante 10 minutos en la hormigonera.

La Fig. 3 presenta el resultado del análisis de difracción de rayos X de las cenizas, que confirmó la presencia de abundante cantidad de material vítreo y cristobalita. En las experiencias sobre morteros destinadas a evaluar la susceptibilidad frente a la reacción álcali – sílice, la ceniza de cáscara de arroz natural se utilizó luego de ser mezclada con la piedra durante 10 minutos (CCAN*).

Tabla 1.CCA residual.

Propiedades		CCAN	CCAN*	CCAM
Finura		En estado original	Mezclada con la piedra durante 10 minutos	Previamente molida
% que pasa	# 50	47	81	100
	# 100	23	39	100
	# 200	18	15	95
Densidad		1,45 a 1,60		2,00 a 2,10



Figura 1. Acopios de cáscara de arroz y de la ceniza en estado natural durante el proceso de homogenización para el estudio experimental.

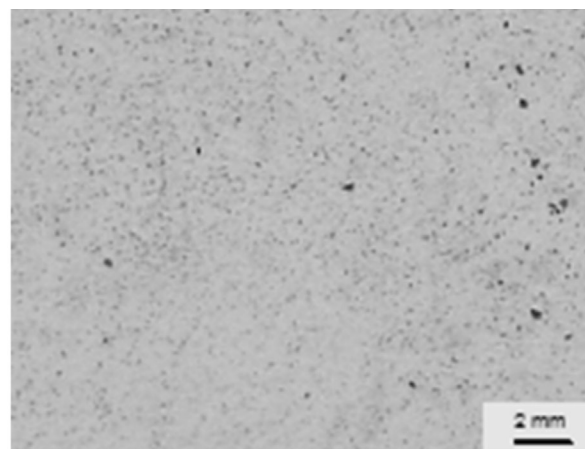
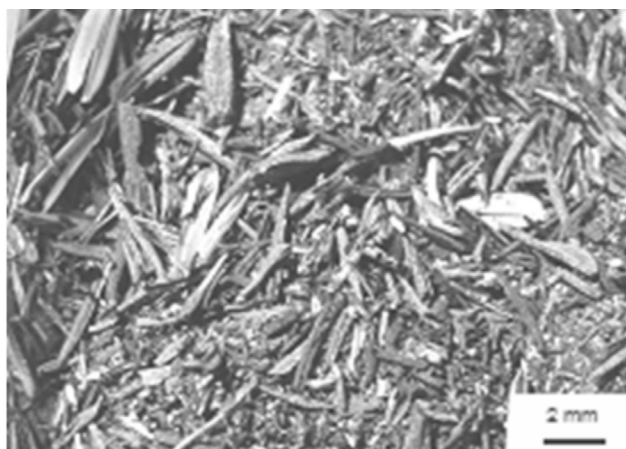


Figura 2. Izq: CCA en estado natural. Der: la misma ceniza luego de ser mezclada 10 minutos en la hormigonera junto con el agregado grueso.

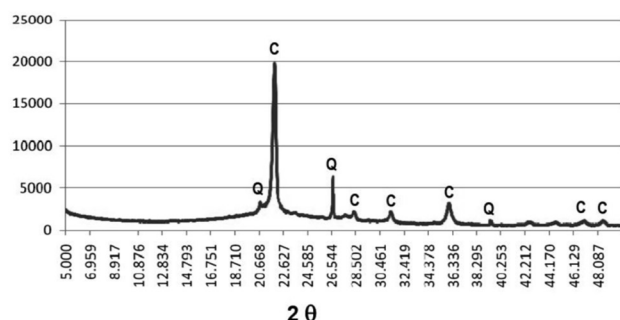


Figura 3. Análisis por difracción de rayos X de la CCAM. C: cristobalita; Q: cuarzo.

USO DE CCA MOLIDA EN HORMIGÓN CONVENCIONAL Y DE ALTA RESISTENCIA

Esta cooperación sobre el uso de CCA desarrollada junto con la UDELAR (Montevideo, Uruguay) tuvo como propósito explorar, considerando sus efectos

en la microestructura del hormigón, la influencia de la incorporación de esta adición mineral (optimizada por molienda) en el mecanismo de falla de hormigones convencionales y de alta resistencia (Giaccio et al 2007).

Se analizaron además de los niveles de resistencia a compresión, los cambios en rigidez (módulo de elasticidad) y en la energía de fractura. A tal efecto se realizaron cuatro series de hormigones con relaciones agua/ligante 0,50, 0,40, 0,32 y 0,28 incluyendo en cada caso una mezcla donde el ligante incluía 10 % de CCA y una mezcla de referencia sin ceniza.

El programa experimental incluyó, a las edades de 28 y 90 días, ensayos de compresión uniaxial sobre cilindros de 150 x 300 mm y de 100 x 200 mm con medición de las deformaciones axiales y transversales a fin de analizar el proceso de formación de fisuras. Además se midieron las curvas carga - apertura de fisura en ensayos de flexión sobre prismas de 105 x 75 x 430 mm cargados en tres

puntos con una entalladura al centro de la cara traccionada, para determinar la resistencia a flexión y la energía de fractura (GF).

En la Fig. 4 se comparan los resultados obtenidos de resistencia a compresión y módulo de elasticidad sobre cilindros de 150 x 300 mm. Para las mezclas analizadas el estudio demostró que el reemplazo de cemento por CCA incrementa la resistencia a compresión y no provoca cambios significativos en los parámetros elásticos (módulo de elasticidad, relación de Poisson). Las tensiones para las cuales se inician y propagan las fisuras a lo largo de la estructura del hormigón bajo esfuerzos de compresión fueron más elevadas en las mezclas que incorporaron CCA, por lo cual se pudo inferir que existe una tendencia a que el mecanismo de falla resulte ligeramente más frágil.

En la Fig. 5 se comparan los resultados en flexión de los hormigones de referencia (sin cenizas) y de aquellas mezclas que incorporan 10 % de CCA como parte del ligante, analizando los valores de la resistencia a flexión, de la energía de fractura y de la longitud característica que constituye un parámetro que brinda una idea del tamaño de la zona de fractura.

En la Fig. 6 se han representado los resultados de la energía de fractura en función de la resistencia a compresión y a flexión. Los ensayos confirman que la CCA produjo un pequeño incremento en la fragilidad del hormigón; mientras la resistencia a flexión permanece relativamente constante, la energía de fractura decrece ligeramente; al mismo tiempo, si se comparan las mezclas con ceniza con las de referencia, se aprecia una reducción en la longitud característica. De todos modos cabe comentar que para un mismo nivel de resistencia los cambios en la energía de fractura fueron menores al 10%, los cuales resultan mucho menores que las variaciones que pueden producirse ante cambios en el tipo o tamaño del agregado grueso.

USO DE CCA EN ESTADO NATURAL

El proyecto “Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz “in natura”, sem beneficiamento”, financiado por el Programa PROSUL fue motivado por el hecho de que adoptando una secuencia de mezclado adecuada, es posible aprovechar el proceso de elaboración del hormigón para reducir el tamaño de partículas de la CCA y consecuentemente conseguir resultados comparables

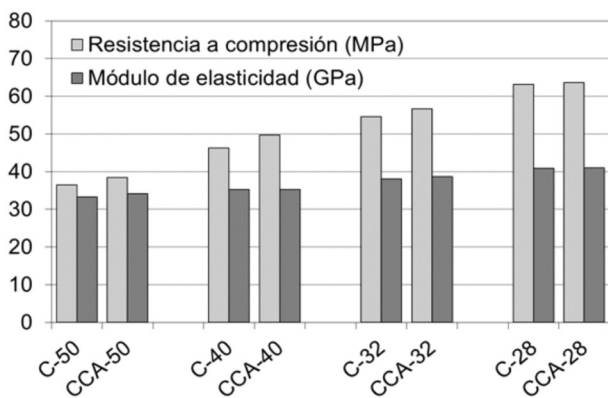


Figura 4. Efecto de la incorporación del 10 % de CCA como parte del ligante en la resistencia a compresión y módulo de elasticidad (sobre cilindros de 150 x 300 mm).

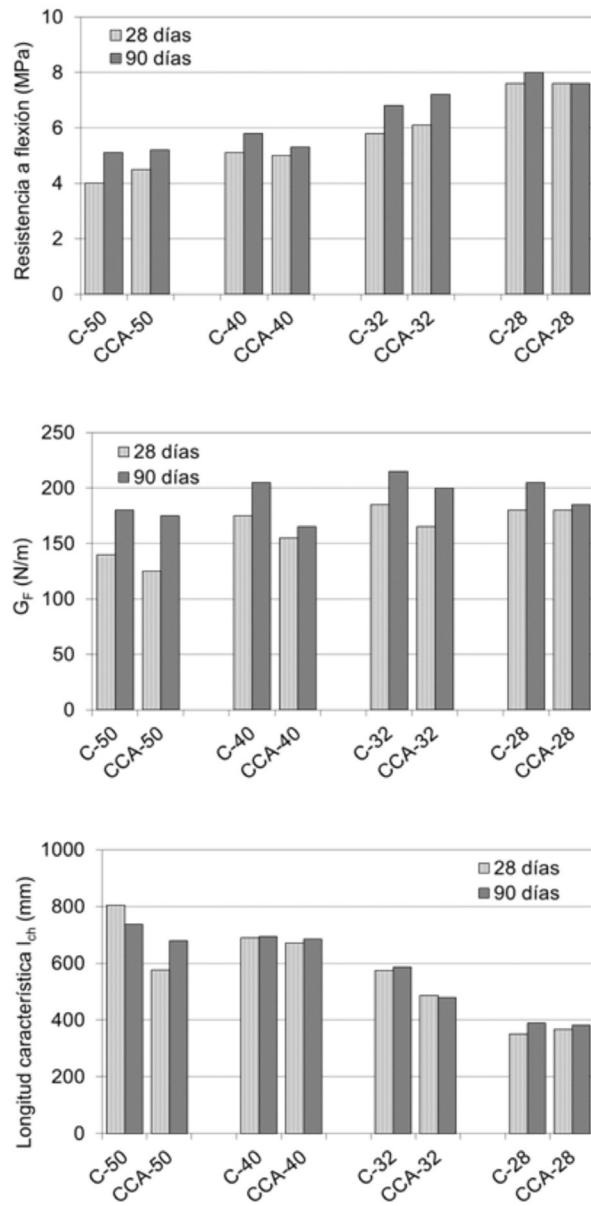


Figura 5. Efecto de la incorporación del 10 % de CCA como parte del ligante en la resistencia a flexión, energía de fractura y longitud característica.

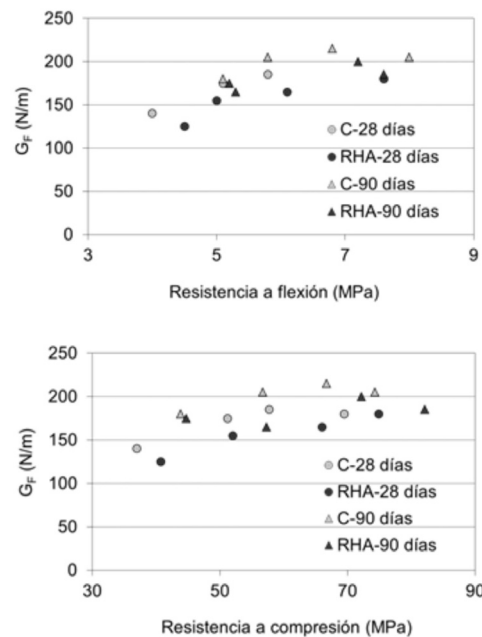


Figura 6. Variación de la energía de fractura en función de la resistencia.

con los de la CCA residual optimizada. De este modo se torna competitiva la CCA residual principalmente para usos locales o próximos a los centros de producción. Para aprovechar estos beneficios potenciales era necesario investigar en detalle no sólo los criterios de elaboración y diseño de hormigones con CCA residual para alcanzar la resistencia deseada, sino también la respuesta de las CCA al ser combinadas con diferentes tipos de cemento, y otros aspectos relacionados con las propiedades físicas, estabilidad dimensional y durabilidad de los hormigones.

El objetivo general del proyecto fue estudiar la viabilidad técnica y los beneficios económicos de la incorporación de CCA residual natural, en hormigones para uso estructural. Una de las premisas fue buscar una aplicación para las cenizas dentro de las zonas de producción, ya que un simple análisis económico muestra que los costos de transporte no son menores. La CCA natural utilizada fue obtenida por quemado sin control de temperatura. Se desarrollaron investigaciones en cada uno de los centros de Argentina, Uruguay y Brasil abordando temáticas que van desde los estudios de la microestructura y el proceso de hidratación en morteros y hormigones con cemento Pórtland y CCA, hasta la durabilidad del hormigón frente a diversos ambientes, pasando por la necesaria etapa de diseño y obtención de mezclas y la caracterización de las propiedades mecánicas. En particular, en el LEMIT se analizaron el desarrollo de la resistencia, la permeabilidad y otras propiedades de transporte, el comportamiento a altas temperaturas, la contracción por secado y la fluencia bajo cargas de compresión y un pormenorizado programa relacionado con el desarrollo de la reacción álcali sílice.

Propiedades físicas y mecánicas

En primer lugar se realizó el ajuste del proceso de mezclado en hormigones con CCAN probando diferentes tiempos y orden de ingreso de los materiales a la hormigonera. Cabe aclarar que el ajuste depende en gran medida del volumen de hormigón así como del equipamiento de mezclado disponible. Como ejemplo, en pastones de 100 litros de

hormigón se mezclaron durante 8 minutos los agregados gruesos y la CCAN y luego se incorporó el resto de los materiales alcanzando un tiempo total de mezclado del pastón de 16 minutos (Giaccio et al 2006).

La Tabla 2 compara los resultados de tres hormigones con igual relación agua/ligante (0,55) y el mismo asentamiento, C: mezcla sin cenizas de referencia, M15: con la ceniza CCAM (optimizada por molienda previa) y el tercero N15: con la CCAN. En ambas mezclas con cenizas se reemplazó 15 % del peso de cemento por CCA. Las proporciones de los hormigones fueron similares y el ligero incremento en el volumen de pasta (por la diferencia de densidad entre el cemento y las CCA) fue compensado con una reducción en el contenido de arena; la mayor demanda de agua en los hormigones con CCA se satisfizo mediante un aditivo reductor de agua.

Sobre el hormigón fresco también se verificaron aspectos como la influencia de la CCA sobre la exudación. La Fig. 7 muestra las curvas agua exudada vs tiempo obtenidas; los hormigones con CCA mostraron una menor capacidad que la muestra control, que alcanzó niveles suficientemente altos como para provocar defectos. Al mismo tiempo se midió mayor velocidad en el hormigón N15. Los niveles de velocidad medidos son bajos y no debieran provocar la aparición de defectos tipo canales.

Sobre el hormigón endurecido se determinaron entre otras propiedades la resistencia a compresión a 28 y 90 días, la penetración de agua a presión y el coeficiente de permeabilidad.

En la Tabla 2 se aprecia que el hormigón con CCAM alcanzó propiedades claramente superiores al hormigón de referencia a pesar de utilizar menos cemento; por su parte el hormigón N15 con iguales proporciones pero con CCAN, verificó niveles de resistencia y propiedades de transporte similares o superiores al hormigón control. La Fig. 8 muestra los rendimientos (resistencia a compresión cada 10 kg de cemento por metro cúbico de hormigón)

a/(c+CCA): 0,55		C	M15	N15
Agua	(kg/m ³)	170	170	170
Cemento		309	263	263
CCAN		-	-	46
CCAM		-	46	-
Arena silícea natural		870	850	830
Piedra partida granítica		990	990	990
Aditivo Superfluidificante		0,2	1,1	1,6
Propiedades del hormigón				
Asentamiento	(mm)	90	90	90
Peso unitario	(kg/m ³)	2390	2390	2330
Contenido de aire	(%)	3,7	2,4	3,6
Temperatura	(°C)	24	25	25
Resistencia a compresión	28 días (MPa)	27,0	33,3	30,3
	90 días (MPa)	32,7	35,4	31,3
Penetración de agua a presión	Valor medio (mm)	34	17	28
	Valor máximo (mm)	73	30	56
Coeficiente de permeabilidad al agua	(10-11m/s)	15,3	No pasa	7,6

Tabla 2. Proporciones y propiedades de los hormigones.

alcanzados por cada una de las mezclas, donde se aprecia que se pudieron lograr con la CCA natural valores comparables a los alcanzados con la CCA optimizada por molienda.

También se estudiaron hormigones con CCA expuestos a altas temperatura. Para realizar el proceso de daño se empleó un horno eléctrico con control automático de temperatura. Se realizaron ciclos hasta 500 o 700 °C y, una vez alcanzada, la temperatura máxima fue mantenida durante una hora; posteriormente se abrió la puerta manteniendo las probetas dentro del horno para producir un enfriamiento lento.

En la Fig. 9 se presentan las curvas tensión – deformación específica longitudinal obtenidas en ensayos de compresión, siguiendo el procedimiento habitual para determinar el módulo de elasticidad, se grafican los tres ciclos de carga. Los hormigones expuestos a alta temperatura muestran un comportamiento no lineal que se acentúa al incrementar el daño (700°C) y crecen significativamente las deformaciones correspondientes a la carga máxima. Asimismo en los hormigones dañados existe una deformación residual luego del primer ciclo de carga, mucho mayor cuando el hormigón es expuesto a

700°C. Es interesante destacar que en los hormigones con CCA estas deformaciones resultaron menores que en el control, principalmente a 700°C.

En síntesis, el extenso estudio realizado sobre la CCA en estado natural verificó la factibilidad de utilizarla en hormigones estructurales de resistencia convencional. Aunque en general no se alcanzó el grado de actividad puzolánica de la misma CCA molida, se comprobó que es posible reemplazar hasta un 15% de cemento Pórtland por CCA natural y lograr similares valores de resistencia a compresión que el hormigón sin cenizas (Zerbino et al 2011). Las investigaciones también demostraron que la adherencia matriz-agregado mejora cuando se incorporan cenizas, y que no se producen cambios significativos en la respuesta tensión-deformación en compresión, ni en la fluencia o la contracción por secado.

Aunque en varias situaciones la incorporación de CCA pudiera resultar beneficiosa, como en el caso de ambientes con sulfatos, es necesario alertar sobre la necesidad de verificar la durabilidad del material para las condiciones de exposición en cada aplicación. Otros estudios del mismo proyecto realizados sobre hormigones con resistencias a compresión a la edad de 28 días entre 20

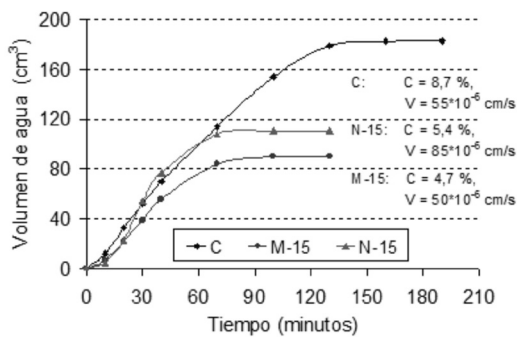


Figura 7. Curvas agua exudada vs tiempo.

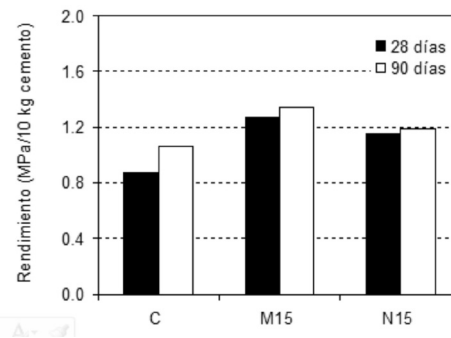


Figura 8. Rendimientos (resistencia a compresión cada 10 kg de cemento por metro cúbico de hormigón) alcanzados por las mezclas.

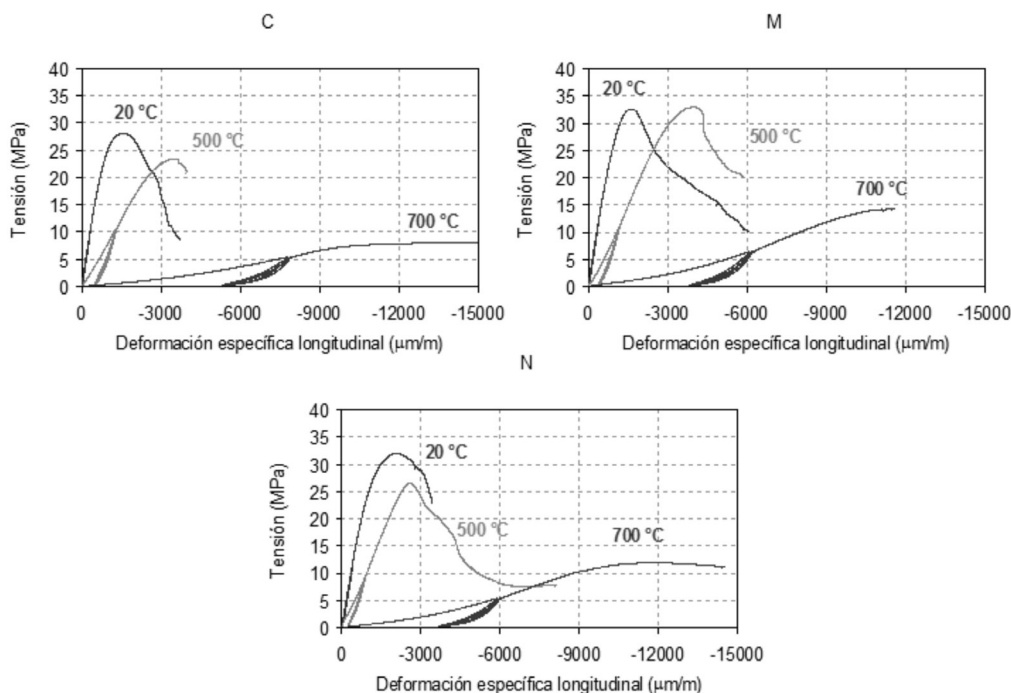


Figura 9. Curvas tensión – deformación longitudinal de los hormigones C, M15 y N15.

y 40 MPa en los que se reemplazó 15% de cemento por CCAN determinando la profundidad de carbonatación, la permeabilidad al oxígeno, y los parámetros de succión capilar, demostraron la viabilidad del uso de la CCAN. Sin embargo, como la CCA está compuesta por minerales silíceos que pueden dar lugar a reacciones deletéreas con el cemento portland, el proyecto incluyó un pormenorizado estudio de la reacción álcali-sílice (RAS) que tuvo lugar en el LEMIT y será desarrollado a continuación.

LA CCA Y LA RAS

Diversos estudios han verificado que la CCA posee propiedades puzolánicas y, en este sentido, pueden colaborar para controlar la reacción álcali-sílice (RAS). Pero en el caso de la CCAN era necesario estudiar en detalle la RAS ya que en este estado el tamaño de partículas de la adición se modificaba substancialmente. En este apartado se describen los pasos seguidos para abordar esta problemática que incluyen estudios acelerados sobre morteros y hormigones empleando agregados reactivos y no reactivos, la observación de la respuesta de mezclas con diferentes cementos, y finalmente el seguimiento del comportamiento de pequeñas losas elaboradas con hormigones que incorporan CCA en distintas proporciones, que constituyen prototipos representativos de la respuesta in situ del material.

Para analizar la respuesta frente a la RAS de hormigones con cenizas de cáscara de arroz, tanto en estado natural (CCAN) como molida (CCAM), se desarrollaron en forma sucesiva tres programas experimentales.

Etapas 1. Morteros y hormigones con agregados reactivos y mezclas de referencia

En el primer programa el objetivo fue evaluar si las cenizas (CCAN o CCAM) provocaban inhibición o exacerbación de la reacción; para ello se hicieron ensayos acelerados a nivel de morteros y de hormigones sobre mezclas con agregados reactivos y mezclas de referencia (Batic et al 2008). Cabe comentar que para realizar los estudios sobre morteros tanto en esta etapa como en la siguiente, dado que no se iba a producir la reducción de tamaño de las partículas de la CCAN durante el mezclado, se usó la CCAN* (ver Tabla 1).

Empleando un agregado fino reactivo se elaboraron 5 morteros, uno Control de referencia y otros cuatro reemplazando el 15 y 25% de cemento por CCA en masa. La Fig. 10 representa la evolución de las expansiones a lo largo del tiempo. El mortero Control a los 16 días superó el valor de 0,100% de expansión considerado como límite; a la misma edad las mezclas con 15 y 25% de CCAM alcanzaron expansiones de 0,069 y 0,187% respectivamente. Para 15% de reemplazo la CCAM presentó un comportamiento inhibitorio de la RAS pero al emplear 25% aumentó la expansión, superando el límite. Con CCAN* la expansión aumentó considerablemente, para el reemplazo del 15% se obtuvo una expansión de 0,370% y para el 25% fue de 0,513%.

Luego se elaboraron dos series de cuatro hormigones cada una. La primera (serie M) con CCAM y la segunda (serie N) con CCAN, y en ambos casos reemplazando 15 y 25% del cemento en masa. Dentro de cada serie

se incluyeron hormigones con el agregado grueso no reactivo (C) y potencialmente reactivo (R). La Fig. 11 muestra la evolución de las expansiones obtenidas hasta la edad de 18 semanas de prismas de hormigón. Como era de esperar, en la Serie M las expansiones de los hormigones con agregados no reactivos fueron menores que las de los que contienen agregados reactivos, sin que sea posible determinar un efecto definido respecto al porcentaje de CCA. Por el contrario, en la serie N las cenizas provocaron una respuesta claramente expansiva, ya a las 2 semanas superando el límite de 0,040% especificado para la edad de un año. Además, a mayor porcentaje de reemplazo de cemento por CCAN aumenta la expansión, lo que indica que actúa incrementando la RAS.

Se concluyó que, en los ensayos de morteros con agregado fino reactivo (IRAM 1674) la CCAN expande mientras que la CCAM, según el porcentaje incorporado, puede producir inhibición o exacerbación de la RAS. En el caso de los hormigones, mientras los que incorporaron CCAM mostraron expansiones IRAM 1700 por debajo del límite de aceptación, los que contenían CCAN superaron el límite tanto con los agregados reactivos como con los no reactivos.

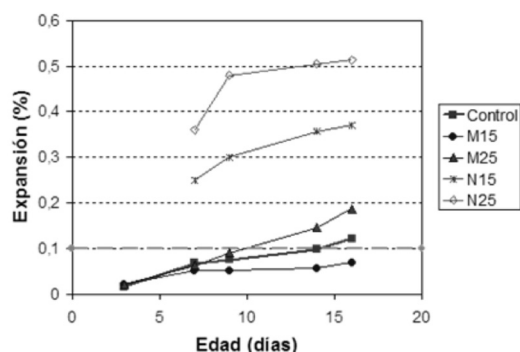


Figura 10. Desarrollo de expansión en prismas de mortero.

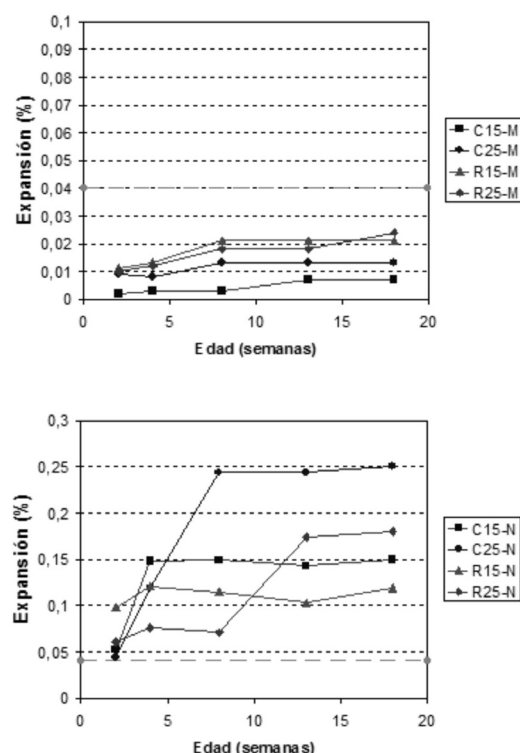


Figura 11. Desarrollo de la expansión en prismas de hormigón. Arriba: Serie M. Abajo: Serie N.

Etapa 2. Selección de cementos para evitar la RAS

Como en la primera etapa se comprobó una respuesta expansiva incluso en mezclas con CCAN que no incorporaban agregados reactivos, se desarrolló un segundo programa para analizar los criterios de selección de cementos para evitar la RAS (Batic et al 2010). El mismo estuvo basado principalmente en ensayos acelerados mediante la barra de mortero, (IRAM 1674), que se complementaron con ensayos mecánicos y observaciones microscópicas. Las mezclas se identifican en base al tipo de cemento, tipo y porcentaje de CCA incorporada. En primer lugar (Serie 1) se realizaron morteros incorporando 15, 30 y 45% de CCAM o CCAN* en reemplazo de un cemento normal procedente de Brasil (PxC: 3,0%, RI: 0,34%, Na₂Oeq: 0,44%) junto con un mortero de referencia sin cenizas. Luego se prepararon otras tres series con diferentes ligantes incluyendo en cada caso un mortero de referencia sin cenizas y morteros con 15% de reemplazo de ligante en peso por CCAN* y CCAM (Serie 2: cemento fillerizado, Brasil, PxC: 5.6%, RI: 8,2%, Na₂Oeq: 0,74 %; Serie 3: cemento Puzolánico, Brasil, PxC: 4,8%, RI: 35,1%, Na₂Oeq: 0.57 %; Serie 4: 70% CPN40, Argentina, PxC: 2,02%, Na₂Oeq: 0,71% + 30% puzolana natural molida a 600 m²/kg, de probada efectividad en la inhibición RAS.). Finalmente se prepararon algunas mezclas con 15% de CCAN molida por separado hasta una superficie específica Blaine de 950 m²/kg (CCAN#) para verificar el efecto del tamaño de partículas sobre el desarrollo de la RAS.

En la Fig. 12 se presentan para cada una de las series las expansiones hasta 28 días de exposición. En la Serie 1 se aprecia con claridad que la CCAN* provoca expansiones muy importantes, siendo la más severa la mezcla con 15 % de cenizas. Es poco efectivo superar este porcentaje de CCAN pues afecta negativamente las propiedades en estado fresco y mecánicas de los hormigones. Con la CCAM se inhibe la reacción, hecho que también se verifica cuando se incorpora CCAN#. En la Serie 2 las expansiones exceden el límite de 0,1% en todas las mezclas, pero resultan mucho más significativas en la mezcla con CCAN*. Todo

lo contrario ocurre con el cemento puzolánico (Serie 3) que muestra bajas expansiones, lo que también se verifica en la Serie 4 donde se combina un cemento normal con una puzolana.

Por último, con el fin de valorar la afectación producto de la RAS sobre la respuesta mecánica de los morteros, y asociarla a las conclusiones que surgen tanto de los estudios de expansión como de las observaciones microscópicas, se implementaron ensayos de flexión y compresión utilizando los mismos prismas de mortero. En la Fig. 13 se muestran curvas tensión – apertura de fisura en flexión, correspondientes a la Serie 1. Es posible observar una menor resistencia a medida que se incrementa el volumen de la CCAM, atribuible a un efecto de dilución, pero no aparecen grandes cambios en la respuesta cualitativa, que permitan inferir un nivel de daño que afecte el mecanismo de falla. Sin embargo, en las mezclas con CCAN*, aún para reemplazos del 15% de cemento, se aprecia no sólo una reducción de la resistencia sino también una clara pérdida de linealidad en la rama ascendente de las curvas y una zona de ablandamiento más extendida, tanto más cuanto mayor es el contenido de CCAN*. Esta observación indica definitivamente la existencia de un cuadro generalizado de microfisuración dentro de la estructura del material. Es interesante destacar que en el caso particular del mortero 1-15N#, donde la ceniza fue molida hasta alcanzar una finura de 950m²/kg, el comportamiento replica a la respuesta del mortero control y al de su par 1-15M.

En la Tabla 3 se sintetizan los resultados obtenidos indicando la resistencia a flexión (módulo de rotura) y a compresión de los morteros, como referencia también se incluye la expansión a los 16 días. La Fig. 14 sintetiza la influencia del tipo de ligante y CCA utilizada sobre la expansión y la resistencia a flexión de los morteros.

El estudio concluyó que el uso de CCAN implica riesgos de RAS, y la consecuente degradación mecánica, que varían conforme el cemento utilizado. El proceso de daño está fuertemente asociado al tamaño de las partículas de las cenizas y se refleja con claridad sobre las propiedades

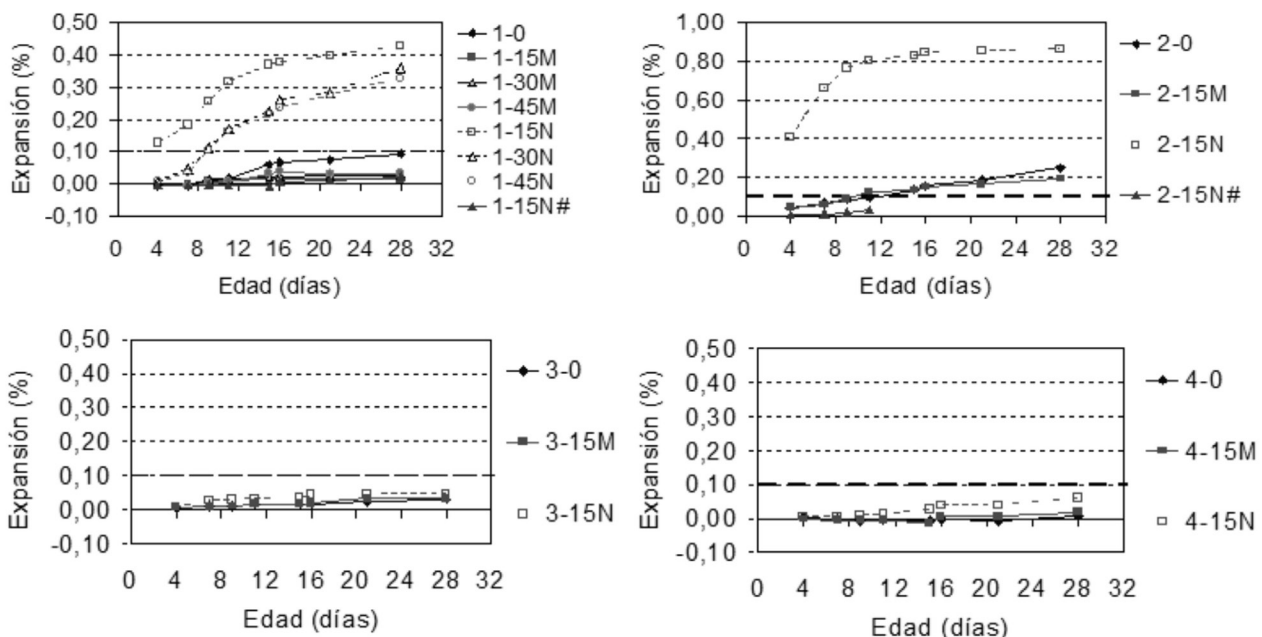


Figura 12. Expansiones en morteros.

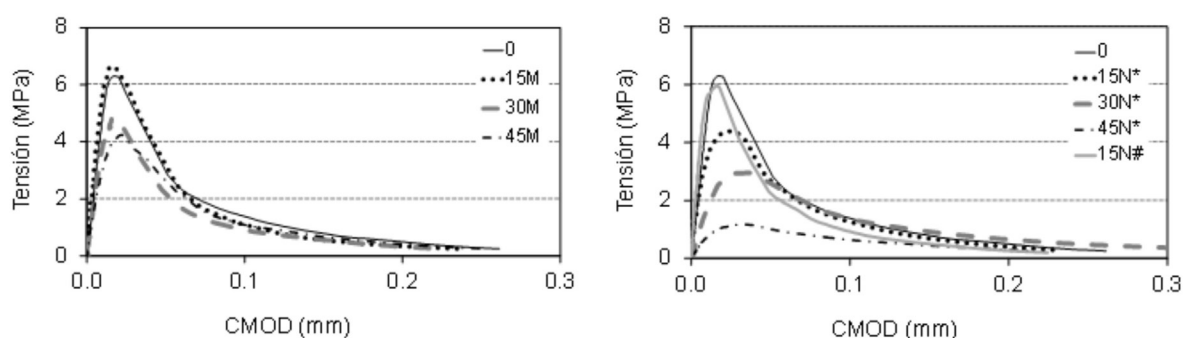


Figura 13. Serie 1. Curvas tensión – apertura de fisura en ensayos de flexión. Influencia del tipo y contenido de cenizas.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de morteros.

Serie	Mortero	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Expansión a 16 días (%)
1	1-0	6,6	46,5	0,066
	1-15M	6,8	46,3	0,014
	1-30M	4,7	31,9	0,022
	1-45M	4,1	28,7	0,038
	1-15N	3,9	29,4	0,376
	1-30N	2,4	13,1	0,260
	1-45N	1,3	9,4	0,236
	1-15N#	6,2	42,7	0,008
2	2-0	4,3	35,7	0,156
	2-15M	4,4	32,3	0,152
	2-15N	2,0	20,4	0,847
3	3-0	4,2	29,4	0,018
	3-15M	4,6	28,5	0,002
	3-15N	4,4	28,1	0,045
4	4-0	5,7	41,5	-0,001
	4-15M	5,5	32,9	0,006
	4-15N	4,5	30,4	0,039

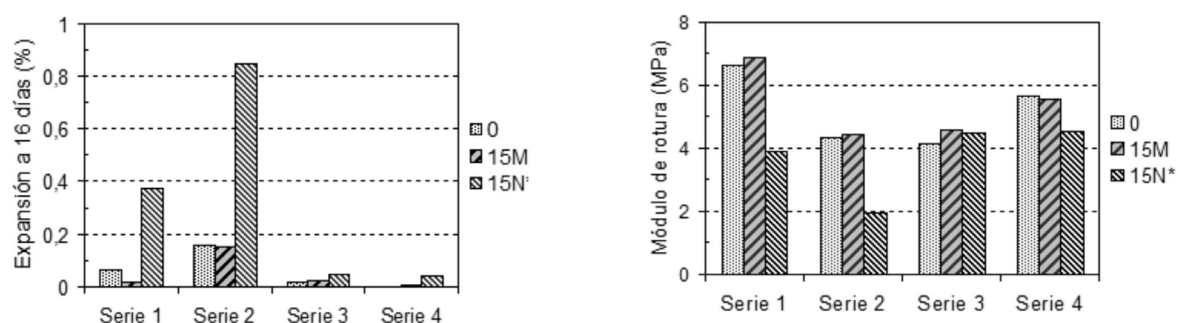


Figura 14- Influencia del tipo de ligante y CCA utilizada sobre la expansión y la resistencia a flexión de los morteros.

mecánicas. El uso de puzolanas permite minimizar la RAS; en cuanto al efecto del contenido de CCAN parece existir un “pesimum” posiblemente asociado a la presencia de cristobalita. Un aspecto interesante es que no se observaron los signos típicos de la RAS, como presencia de geles, incluso en morteros con grandes expansiones. Al realizar experiencias complementarias preparando morteros con cenizas sin incorporar álcalis, se verificó la ausencia de procesos deletéreos, confirmando de este

modo la influencia decisiva de la presencia de álcalis en el proceso de degradación.

Etapa 3. Estudios sobre prototipos

El tercer programa, tuvo como objetivo valorar la respuesta de pequeñas losas de hormigón en las condiciones ambientales propias de la región (Zerbino et al 2012). Las losas fueron estudiadas durante tres años incluyendo una

mezcla de referencia sin cenizas, hormigones con CCAN y CCAM incorporando álcalis y sin ellos. Además de estudiar las expansiones y el cuadro de fisuración sobre las superficies de las losas se determinaron expansiones y propiedades mecánicas sobre prismas y cilindros.

Se fabricaron dos series de losas (A y B) empleando cemento Pórtland normal y agregados finos y gruesos no reactivos: piedra granítica de 19 mm de tamaño máximo y arena silíceo natural. En la Serie A se realizaron un hormigón de referencia (A1) con 420 kg/m³ de cemento y dos hormigones en los que se reemplazó 15% de cemento en peso por CCAM (A2) y CCAN (A3). En estos casos se agregó NaOH hasta alcanzar 5,25 kg/m³ de álcalis total conforme establece la norma IRAM 1700. En la Tabla 4 se muestran las proporciones y propiedades en estado fresco de los hormigones elaborados.

Las losas se ubicaron en uno de los patios del LEMIT y junto a ellas se ubicaron cilindros de 100 x 200 mm y prismas de 75 x 75 x 300 mm que fueron moldeados para medir las variaciones dimensionales. Tanto los prismas como los cilindros se dividieron en dos grupos, uno permaneció junto a las losas y el otro se mantuvo a 38 °C en condiciones saturadas dentro de bolsas plásticas (IRAM 1700). Pasados 4 meses se extrajeron de las losas testigos de 100 mm de diámetro para estudiar las propiedades mecánicas.

Sobre la superficie de las losas se pegaron repes para realizar un seguimiento de las expansiones, para lo cual

se empleó un extensómetro de láminas paralelas. Esto permitió comparar las expansiones medidas en prismas y losas y seguir su evolución en el tiempo. A diferentes edades durante el transcurso de las experiencias se determinaron la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de los hormigones.

Como la losa A2, que incorporaba CCAN y un alto contenido de álcalis, mostró una degradación importante luego de algunos meses de exposición, se planteó un segundo grupo de prototipos (Serie B) que incluye tres losas de 0,50 x 0,50 x 0,10 m. En este caso todos los hormigones incorporaron CCAN a razón de 15% en peso de cemento, variando el contenido de material cementíceo y el contenido de álcalis. En la losa B1 se introdujeron 5,25 kg/m³ de álcalis total (Na₂O_{eq}) y 420 kg/m³ de contenido total de cemento más cenizas. La losa B2 se preparó con las mismas proporciones que la losa B1 pero sin adicionar álcalis (ver Tabla 2), mientras que la losa B3 también fue preparada sin incrementar el contenido de álcalis pero el contenido de material cementíceo se redujo a 330 kg/m³ (280 kg/m³ de cemento y 50 kg/m³ de CCAN). Con estas proporciones se había alcanzado una resistencia a compresión de 30 MPa a la edad de 28 días (Zerbino et al 2011).

Las losas B1 a B3 se ubicaron en las mismas condiciones ambientales que las losas de la serie A. Nuevamente se realizaron medidas sobre prismas y cilindros ubicados junto a las losas y también se ubicaron probetas en condiciones saturadas a 38 °C.

Tabla 4. Propiedades mecánicas.

Concrete	Serie A			Serie B		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
CPN1 (kg/m ³)	420	357	357			
CPN2 (kg/m ³)				357	357	280
CCAN (kg/m ³)			63	63	63	50
CCAM (kg/m ³)		63				
Na ₂ O _{eq} (kg/m ³)	5,25			5,25	2,86 *	2,24 *
a(c+CCA)	0,44			0,44	0,44	0,56
Asentamiento (mm)	180 ± 10			80 ± 5		
Dimensiones	0,80x0,60x0,20 m			0,50x0,50x0,10 m		

*Suministrados por el cemento

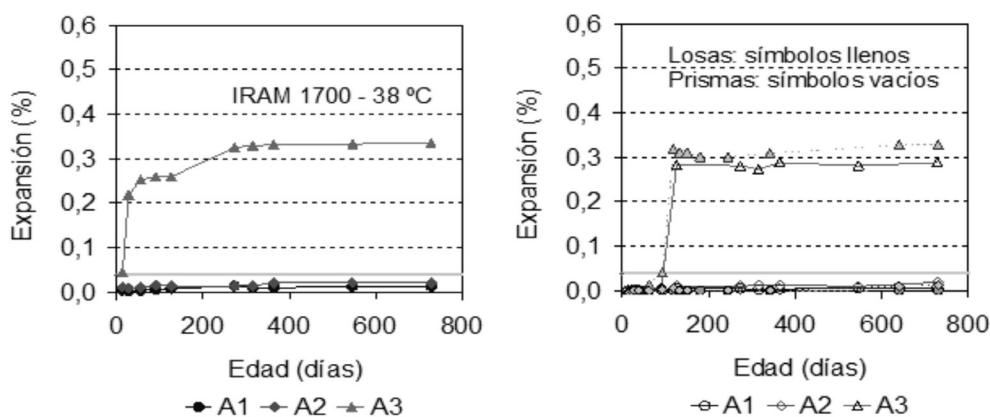


Figura 15. Serie A. Evolución de las expansiones en el tiempo. a) Izq. Ensayos normalizados. b) Der: medidas sobre losas y prismas ubicados junto a ellas.

El proceso de degradación se refleja en los valores de expansión medidos tanto sobre prismas como sobre las superficies de las losas. En la Fig. 15 se aprecian los fuertes incrementos de expansión en A3 mientras en A1 y A2 las expansiones siempre están por debajo del límite de 0,04 %.

En la Figura 16 se muestra el aspecto de las losas y en la Tabla 5 se sintetizan los resultados de las propiedades mecánicas medidas en ambas series.

En la Figura 17 se muestran las expansiones correspondientes a la Serie B y en la Figura 18 el aspecto de las losas. Si se consideran los resultados obtenidos, se vuelven a verificar expansiones significativas y fisuración en la losa B1 preparada con 420 kg/m³ de material cementíceo y 5,25 kg/m³ de Na₂O_{eq}. La situación es diferente en el caso de B2 y B3, donde los álcalis son

sólo los aportados por el cemento, las expansiones están por debajo del límite y, como era de esperar son menores en el caso de la losa con menor contenido de cemento y ceniza (B3); aunque las expansiones fueron menores a 0,04 % se vieron pequeñas fisuras en B2 a la edad de 1 año. La resistencia de los hormigones B2 y B3 evolucionó entre 1 y 12 meses, por su parte el hormigón B1 repitió el comportamiento observado en A3 y sus propiedades mecánicas resultaron inferiores a las de B2 incluso a la edad de 1 mes, con el transcurrir de los meses se continuó verificando la degradación en B1. En los cilindros expuestos a 38 °C se verifica una mayor degradación que en aquellos conservados junto a las losas.

Las observaciones visuales y microscópicas realizadas en los hormigones con CCAN con alto contenido de álcalis, y condiciones de temperatura y humedad adecuadas para el desarrollo de la RAS, mostraron claros signos de daño producto de las reacciones expansivas, sin embargo no fue posible detectar la presencia de gel (Zerbino et al 2014).

En síntesis, el uso de ceniza de cáscara de arroz residual sin procesar (CCAN) trae aparejado un proceso de daño que involucra una fisuración generalizada si existe suficiente disponibilidad de álcalis en el medio y condiciones de temperatura y humedad propias de aquellas que favorecen la reacción. Mediante ensayos acelerados en morteros se observó que la CCAN provoca expansiones mientras que la misma ceniza molida (CCAM) puede inhibir o exacerbar la reacción dependiendo del contenido de ceniza incorporado. Los niveles de degradación dependen del cemento empleado. La presencia de puzolanas minimiza el riesgo de reacción. Se demuestra que mediante una adecuada selección del cemento no existen mayores riesgos en el uso de la CCAN en lo que respecta al desarrollo de la RAS. Los hormigones con CCAM mostraron expansiones (IRAM 1700) por debajo del límite de 0,040 %, mientras que en aquellos que incorporaron CCAN se verificaron

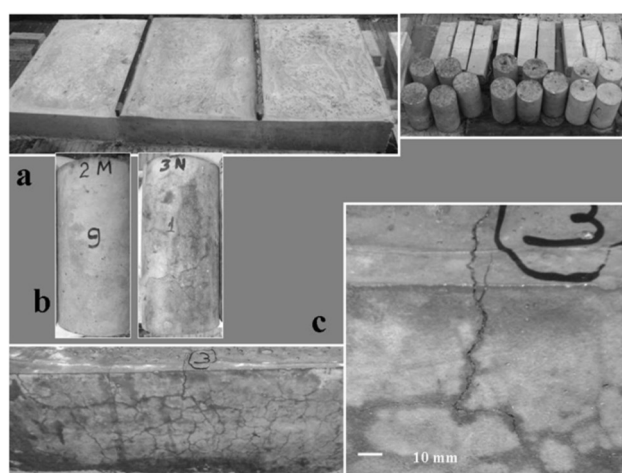


Figura 16. Serie A. a) Vista de las losas y las probetas; b) aspecto de la superficie de cilindros de A2 y A3, c) Borde de la losa A3 y ampliación.

Tabla 5. Propiedades mecánicas.

	Resistencia a compresión (MPa)					Valores relativos (%)			
	Probetas			testigos	testigos / probetas	Probetas			testigos
Meses	1	4	36	4		1	4	36	4
A1	31,6	34,5	56,1	42,2	1,22	100			
A2	31,0	36,6	56,3	42,3	1,16	98	106	100	100
A3	32,7	22,7	36,2	26,0	1,15	104	66	64	62
Módulo de elasticidad (GPa)					Valores relativos (%)				
A1	32,2	32,6	35,4	38,5	1,18	100			
A2	30,8	33,5	32,0	31,7	0,95	96	102	90	82
A3	26,6	8,7	10,6	8,3	0,95	82	27	30	22
Resistencia a compresión (MPa)					Valores relativos (%)				
Meses	Probetas junto a las losas				38 °C / exterior	Probetas junto a las losas			38 °C
	1	3	12	3		1	3	12	
B1	26,4	19,7	35,1	26,7	0,76	89	53	68	56
B2	29,5	36,9	51,5	47,5	0,92	100			
B3	21,2	23,1	39,5	35,4	0,90	72	62	77	74
Módulo de elasticidad (GPa)					Valores relativos (%)				
B1	23,2	9,8	13,2	7,4	0,56	86	27	40	22
B2	26,9	36,1	32,7	33,6	1,03	100			
B3	26,4	34,2	31,7	31,0	0,98	98	95	97	92

drásticas expansiones. Un aspecto interesante es que no se observaron los signos típicos de la RAS como es la presencia de geles. En estudios de campo cuando se suministraron álcalis a la mezcla, los hormigones con CCAN se comportaron en forma acorde a la observada en los estudios acelerados sobre probetas; cuando los álcalis fueron sólo aquellos que aportaba el cemento ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} < 2,86 \text{ kg/m}^3$) sólo se apreciaron pequeñas fisuras, no se midieron mayores expansiones ni se afectaron las propiedades mecánicas.

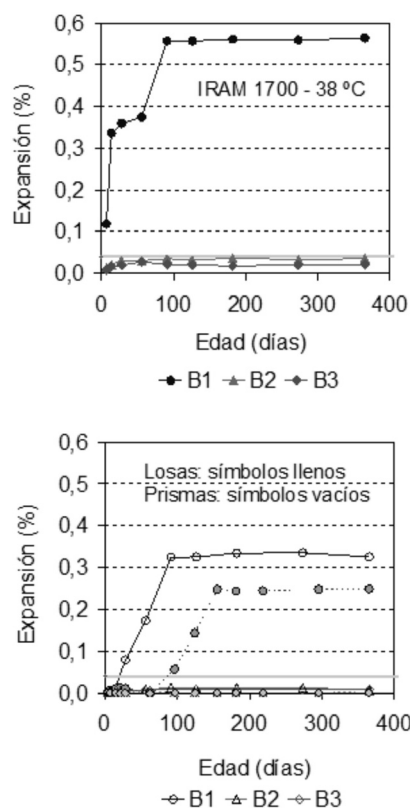


Figura 17. Serie B. Evolución de las expansiones en el tiempo. a) Arriba: Ensayos normalizados. b) Abajo: medidas sobre losas y prismas ubicados junto a ellas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los resultados de varias investigaciones desarrolladas en el LEMIT vinculadas al uso de cenizas de cáscara de arroz sin quema controlada en hormigones. Los mismos fueron realizados en cooperación con el GEPECON/UFSM Santa Maria, Brasil, y la UDELAR de Montevideo, Uruguay. Estos estudios resultan significativos en cuanto a que en la

REFERENCIAS

- Batic, O.R., Giaccio, G. y Zerbino, R. (2008). “Estudio de la reactividad álcali - sílice en hormigones con cenizas de cáscara de arroz”. En: Memorias del III Congreso internacional y 17° Reunión Técnica AATH, Córdoba, Argentina, ISBN 978-987-21660-3-8. AATH-UTN Fac Reg Córdoba. Eds. V Rahhal y J. Sota, pp. 281-288.
- Batic, O.R., Giaccio, G., Zerbino, R. and Isaia, G. (2010). “Las Cenizas de Cáscara de Arroz y la Reacción Álcali Sílice”. CINPAR 2010, VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, Córdoba, Argentina. En CD. Eds. J. Positieri, A. Oshiro y C. Baronetto. Tópico 3.Trabajo 20.
- Giaccio, G., Rodríguez, G. and Zerbino R. (2007). “Failure mechanism of Normal and High-Strength concrete with Rice-Husk Ash”. Cement and Concrete Composites, Vol. 29, N° 7, pp. 566-574.
- Giaccio, G., Zerbino, R., Tobes, J.M., López, A., Isaia, G.C. y Rodríguez de Sensale, G. (2006). “Aprovechamiento de la ceniza de cáscara de arroz para la elaboración de hormigones”. Ciencia y Tecnología del Hormigón, ISSN: 0327-4845, N° 13, pp. 7-20.

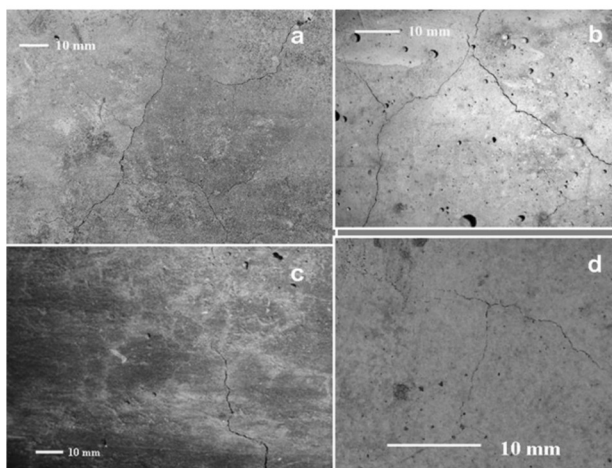


Figura 18. Serie B. Hormigón B1: a) aspecto de la superficie de la losa, b) superficie de un cilindro, c) borde de la losa. Hormigón B2: d) superficie de la losa.

región no sólo existe disponibilidad de cenizas sino que incluso en varias situaciones representa un residuo cuya disposición final merece atención.

En primer lugar se verificó que las cenizas de la región, optimizadas mediante molienda, pueden ser incorporadas tanto en hormigones convencionales como en hormigones de alta resistencia. Los mecanismos de falla y la capacidad de absorción de energía no se vieron mayormente afectados.

Luego se presentaron los resultados de un extenso proyecto que demuestran la factibilidad de empleo de las cenizas de cáscara de arroz residual en estado natural, sin molienda previa, a partir de la optimización del proceso de mezclado. Esta metodología resultó apta para la elaboración de hormigones de resistencia media convencional, y puede resultar de suma utilidad para el aprovechamiento del residuo en obras próximas a las zonas productoras de arroz.

Finalmente se describió un estudio sobre el desarrollo de la RAS en mezclas con CCA. El mismo incluyó ensayos acelerados y de laboratorio, y estudios sobre prototipos; esto constituye una contribución tanto desde el punto de vista de la aplicación de la CCA como en lo relativo a los mecanismos involucrados en el desarrollo o inhibición de la RAS, a los productos de reacción, y, a los efectos del daño producido por la RAS sobre las propiedades mecánicas residuales.

http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Rice/Images/RMM/SMA_OCT16.pdf

James, J. and Rao, M.S. (1986). "Reactivity of rice husk ash". *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, pp. 296-302. Malhotra, V.M. and Mehta, P.K. (1996). "Pozzolanic and Cementitious Materials". *Advances in Concrete Technology*, Vol. 1, Gordon and Breach Publ., Canada, 191 p.

Mehta, P.K. (1992). "Rice Husk Ash - A unique supplementary cementing materials". In *Advances in Concrete Technology*, Ed. V.M. Malhotra, Ontario, CANMET, pp. 407- 431.

Mehta, P.K. (1994). "Highly durable cement products containing siliceous ashes". United States Patent Number 5, 346, 548. Sep. 13, 15 p.

Rodriguez de Sensale, G. (2006). "Strength development of concrete with rice-husk ash". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, N° 2, pp. 158-160.

Zerbino, R., Giaccio, G. and Isaia, G.C. (2012). "Alkali - silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash". *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp 796-806.

Zerbino, R., Giaccio, G. and Marfil, S. (2014). "Evaluation of alkali-silica reaction in concretes with natural rice husk ash using optical microscopy". *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp. 706–715.

Zerbino, R., Giaccio, G., Isaia, G.C. (2011). "Concrete incorporating rice husk ash without processing". *Construction and Building Materials*, Vol. 25, N° 1, pp. 371-378.

Zhang, M.H. and Malhotra, V.M. (1996). "High-performance concrete incorporating RHA as a supplementary cementing material". *ACI Materials Journal*, Vol. 93, N° 6, pp. 629-636.

Zhang, M.H., Lastra, R. and Malhotra, V.M. (1996). "Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste". *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, N° 6, pp. 963-977.