

APROVECHAMIENTO DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES

Giaccio, G.¹, Zerbino, R.², Tobes, J.M.³, López, A.³,
Isaia, G. C.⁴ y Rodríguez de Sensale, G.⁵

RESUMEN

Este trabajo se encuadra en el marco del proyecto conjunto de investigación "Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz "in natura", sem beneficiamento", que se está desarrollando entre el Centro de Tecnología, Departamento de Estruturas e Construção Civil (GEPECON/UFSM Universidade Federal de Santa Maria, Brasil), la Universidad de la República (UDELAR, Montevideo, Uruguay) y el LEMIT-CIC, como parte del Programa PROSUL (Programa Sul-Americano de Apoio às Atividades de Cooperação em Ciência e Tecnologia). En este artículo se describe la relevancia del problema, los objetivos y etapas del proyecto y se presentan los primeros resultados experimentales obtenidos en LEMIT destinados al ajuste de mezclas. Se incluyen resultados de resistencia sobre hormigones con diferentes relaciones agua/ligante elaborados con contenidos variables de cenizas de cáscara de arroz. Se comparan cenizas empleadas en estado natural (sin moler) con las mismas cenizas previamente molidas, que es el procedimiento tradicionalmente utilizado para incrementar su actividad puzolánica.

INTRODUCCION

El aprovechamiento y disposición de residuos en materiales a base de cemento portland constituye una de las líneas de investigación abordadas por el LEMIT desde hace varios años. Entre los estudios desarrollados se pueden citar el uso de hormigón reciclado, el empleo de cenizas de residuos patogénicos y la utilización de residuos industriales. Esto se suma a las ya tradicionales líneas de trabajo sobre el uso de adiciones minerales en cementos y hormigones, desarrolladas por LEMIT desde hace más de dos décadas.

En la actualidad se ha renovado la atención sobre estos temas debido a la creciente incorporación de adiciones en los cementos comercializados. En efecto, la necesidad de aplicar criterios de desarrollo sustentable en la industria de la construcción adquiere un rasgo particular en lo que se refiere a minimizar el consumo de clinker favoreciendo un mayor consumo de adiciones minerales. Los beneficios ambientales, que se suman a las ventajas técnicas y económicas, pueden ser muy significativos considerando que el hormigón es el material de construcción de mayor consumo en el mundo. Si se toma en cuenta que el cemento como materia prima contribuye con cerca del 7 % de las emanaciones totales de CO_{2eq}, con sus consecuentes efectos negativos para el incremento

¹ Investigador CIC-LEMIT- Prof. Facultad de Ingeniería UNLP.

² Investigador CONICET-LEMIT- Prof. Facultad de Ingeniería UNLP.

zerbino@ing.unlp.edu.ar

³ Becario CONICET-LEMIT

⁴ Profesor Doctor, PPGEC, UFSM, Brasil.

⁵ Profesor Agregado IEM, Facultad de Ingeniería - UDELAR, Uruguay.

del efecto invernadero, es evidente que la producción de clinker no debiera incrementarse y las crecientes necesidades de cemento deben ser cubiertas mediante el empleo de adiciones minerales.

Este es el marco donde se encuadra el proyecto conjunto de investigación "Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz "in natura", sem beneficiamento", que se está desarrollando entre el Centro de Tecnología, Departamento de Estruturas e Construção Civil (GEPECON/UFMS Universidade Federal de Santa Maria, Brasil), la Universidad de la República (UDELAR, Montevideo, Uruguay) y el LEMIT-CIC, como parte del Programa PROSUL (Programa Sul-Americano de Apoio às Atividades de Cooperação em Ciência e Tecnologia).

En este artículo se describe la relevancia del problema, los objetivos y las etapas del proyecto y se presentan los primeros resultados experimentales obtenidos en LEMIT destinados al ajuste de mezclas. Se incluyen resultados de resistencia sobre hormigones con diferentes relaciones agua/ligante elaborados con contenidos variables de cenizas de cáscara de arroz. Se comparan cenizas empleadas en estado natural (sin moler) con las mismas cenizas previamente molidas, que es el procedimiento tradicionalmente utilizado para incrementar su actividad puzolánica.

Relevancia del problema

La agricultura constituye uno de los pilares de la economía de Brasil, Argentina y Uruguay. La Asociación Cultivadores de Arroz (1) indica para la zafra agrícola 2003/2004 una producción de 12.100.000 t para Brasil, 990.000 t para Argentina y 1.320.000 t para Uruguay, lo que implica un total de 14.410.000 t. Gran parte de la misma corresponde a una zona geográfica bien definida: la región del Mercosur que comprende el estado de Rio Grande do Sul, Uruguay y la Mesopotamia Argentina. En esta región, con un área total aproximada de 660.000 km² distribuida en forma continua entre los tres países y una población cercana a 16.500.000 habitantes, se producen cerca de 8.000.000 t de arroz. Esta cifra representa el 1,4% de la producción mundial, el 40% de la de América del Sur y el 59% de la producción del MERCOSUR. El estado de Río Grande contribuye con unas 6.300.000 t, aproximadamente 78% del total; en Uruguay el 84 % de la producción ocurre en los territorios de Rocha, Treinta y Tres, Cerro Largo y Artigas; mientras que en Argentina el 81 % de la producción corresponde a las provincias de Entre Ríos y Corrientes.

Cada tonelada de arroz genera en término medio 200 kg de cáscara que luego de quemada da lugar a unos 40 kg de ceniza. La ceniza de cáscara de arroz es un material silíceo que debe ser depositado o utilizado adecuadamente para evitar la contaminación. Un cálculo grosero permite estimar que se podría generar una cantidad de cenizas cercana a las 320.000 t/año en la región, que de no ser planificada su disposición se traduciría en un grave problema para el medio ambiente. Si bien existen antecedentes de la excelente calidad que pueden alcanzar las cenizas bajo combustión controlada (2) es de señalar que 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.

El uso de cenizas de cáscara de arroz (CCA) como otras adiciones minerales (cenizas volantes, microsílíce, escorias de alto horno, etc.) ha ganado interés en el campo de la tecnología del hormigón dadas las cualidades de este material para albergar tales

subproductos con ventajas técnicas, económicas y ambientales. Cuando la CCA se produce por combustión controlada (2-5) se genera una puzolana altamente reactiva que puede provocar incrementos de resistencia desde edades tempranas. Bajo condiciones de quema no controlada se produce una puzolana de menor calidad, denominada CCA residual.

Se han realizado numerosas investigaciones sobre el uso de CCA residual pero aún no existe disponibilidad del producto en el mercado sudamericano. Esto ocurre en parte porque para mejorar las propiedades es necesario incorporar un proceso de optimización que básicamente consiste en una molienda adecuada para favorecer la actividad puzolánica. Este proceso, como es fácil suponer, implica un costo no despreciable. Otras dificultades para el empleo de la CCA en hormigones y otros materiales con cemento portland se relacionan con aspectos estéticos dado que la presencia de carbono residual confiere al hormigón una coloración oscura.

Un estudio exploratorio desarrollado en GEPECON/UFSM (6) sobre el empleo de CCA residual en estado natural (sin moler) indica que, adoptando una secuencia de incorporación de los materiales a la hormigonera y tiempos adecuados, es posible aprovechar el proceso de mezclado del hormigón para reducir el tamaño de partículas de la CCA y consecuentemente conseguir resultados comparables con los de la CCA residual optimizada. Esto adquiriría un impacto notable pues haría competitiva a la CCA residual. A modo de ejemplo, se encontraron niveles de resistencia similares sustituyendo 20 % del cemento y 10 % de la arena por CCA residual natural a los obtenidos al reemplazar 30 % del cemento por CCA residual molida. Si la alternativa de evitar el proceso previo de molienda resultare viable, las posibilidades de empleo de la CCA residual crecerían en forma notoria.

Para que estos beneficios potenciales se concreten es necesario investigar en detalle no sólo los criterios de elaboración y diseño de hormigones con CCA residual natural para alcanzar una resistencia deseada, sino también la respuesta de las CCA al ser combinadas con diferentes tipos de cemento, al igual que otros aspectos relacionados con las propiedades físicas, estabilidad dimensional y durabilidad de los hormigones. Al respecto será de interés un estudio comparativo con la CCA residual optimizada.

Objetivos del proyecto e instituciones participantes

Este proyecto conjunto tiene por objetivo general estudiar la viabilidad técnica y los beneficios económicos del uso de CCA residual natural, quemada sin control de temperatura y sin proceso de optimización (sin premolida ni selección de partículas), en hormigones de cemento portland para uso estructural. Verificados los aspectos relacionados con el diseño de mezclas se estudiarán las propiedades vinculadas con la durabilidad y estabilidad dimensional a fin de sustentar su aplicación en la industria de la construcción.

Es interesante notar que los tres grupos de investigación (GEPECON, UDELAR, LEMIT-CIC) poseen una proximidad geográfica propicia para el desarrollo del estudio conjunto, los centros se ubican dentro de un radio de unos 1000 km. La primera etapa del estudio se realizará con una ceniza procedente del estado de Rio Grande do Sul, que será empleada en forma paralela en los tres centros de investigación, combinada con los cementos y agregados de uso habitual en cada región. El estudio simultáneo dará mayor potencialidad a los resultados relativos al diseño de mezclas y propiedades resistentes. Al mismo tiempo según las fortalezas de cada equipo de investigación se desarrollarán en una

etapa posterior diversos estudios de durabilidad específicos de forma tal de cubrir las diferentes alternativas de aplicación.

Las tres instituciones poseen experiencia y tradición en investigación sobre adiciones minerales en hormigón; para el caso específico de las CCA, el GEPECON ha desarrollado numerosas contribuciones (6-8), por su parte la Prof. G. R de Senzale realizó su tesis doctoral sobre el tema (9) y recientemente se abordaron investigaciones conjuntas en LEMIT-CIC (10).

EXPERIENCIAS

Materiales

Para estudiar la viabilidad técnica y económica del empleo de CCA residual en la producción de hormigón estructural se seleccionaron como materiales una CCA producida en el estado de Santa Catarina, Brasil. La misma fue cuidadosamente seleccionada, homogeneizada y preparada en dos condiciones

- CCA natural (N), la ceniza fue solamente secada para facilitar la homogeneización, envasado y posterior transporte.
- CCA molida (M): luego del secado se realizó un proceso de molienda para su optimización.

En la Tabla 1 se muestran algunas características de las cenizas empleadas. En el caso de la CCA N, 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 CCA N 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. La Fig. 1 muestra el aspecto de la ceniza en su estado natural y el de la ceniza molida.

Tabla 1. CCA residual.

Propiedades		CCA N (natural)		CCA M (molida)
Densidad		1.45 a 1.60		2.00 a 2.10
Finura		Estado original	Mezclada con la piedra durante 10 minutos	
% que pasa	# 50	47	81	100
	# 100	23	39	100
	# 200	18	15	95

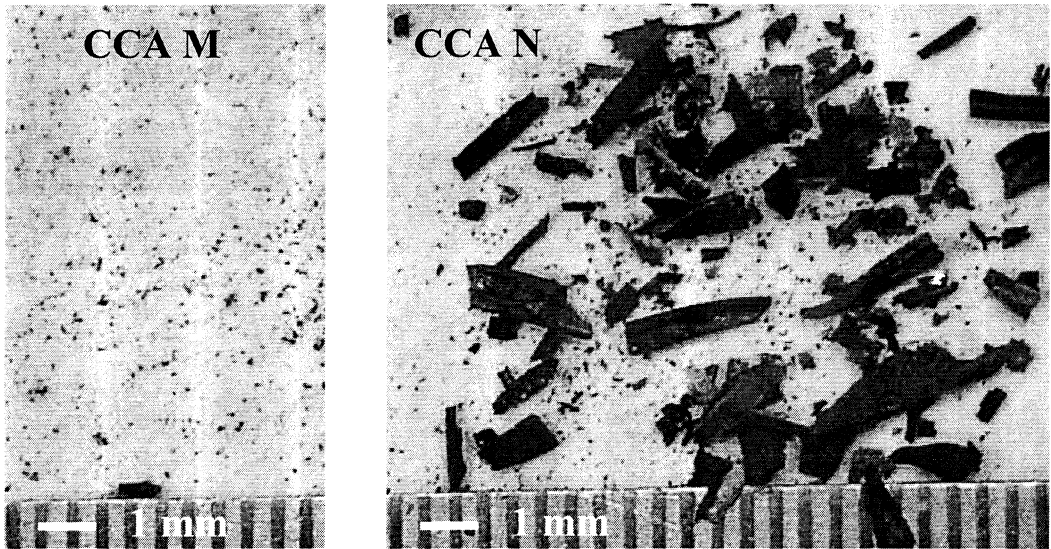


Figura 1. Cenizas de cáscara de arroz, izquierda: optimizada por molienda (CCA M); derecha: en estado natural (CCA N).

En las experiencias desarrolladas en LEMIT que se incluyen en este artículo se emplearon además cemento portland normal (CPN40), y como agregados arena silícea natural (módulo de finura 2.36, densidad 2.63) y piedra partida granítica (19 mm de tamaño máximo, densidad 2.68).

Para compensar los cambios de trabajabilidad y reducir las diferencias entre las proporciones de las mezclas se utilizó un aditivo superfluidificante. La dosis requerida fue mayor en los hormigones con cenizas, en especial con CCA N.

Primera etapa. Proporciones y propiedades del hormigón fresco

Los estudios aquí presentados corresponden a la etapa de ajuste de mezclas cuyo objetivo específico fue verificar la capacidad puzolánica de las cenizas, identificar los porcentajes más adecuados y obtener una base de referencia a fin de diseñar hormigones con la resistencia deseada. En las siguientes etapas el programa incluye otros estudios de hormigones con CCA que comprenden, entre otros, la valoración de las propiedades del hormigón fresco, la susceptibilidad frente a la reacción álcali – sílice, la resistencia y deformabilidad en hormigones expuestos a altas temperaturas, y estudios de contracción por secado y fluencia bajo cargas de larga duración.

En la primera etapa se plantearon hormigones con tres relaciones agua/ligante iguales a 0.45, 0.55 y 0.65. En cada caso se elaboraron un hormigón de referencia (C) y cuatro hormigones utilizando ambas cenizas (N y M) en contenidos iguales al 15 y al 25 % de CCA como reemplazo en peso del cemento. Dada la diferencia de densidad entre las cenizas y el cemento, el incremento de volumen del ligante fue compensado mediante una reducción del contenido de arena.

Los hormigones se diseñaron buscando obtener asentamientos del orden de 80 ± 20 mm, las diferencias de trabajabilidad fueron compensadas mediante la incorporación de un aditivo superfluidificante con base en una cadena de eter carboxílico modificado.

Para favorecer la reducción de tamaño de partículas en el caso de la CCA natural se modificó el orden de mezclado. Los tiempos de mezclado y orden de incorporación de los materiales fueron adoptados tomando como referencia experiencias previas desarrolladas en GEPECÓN. El criterio seguido fue, a diferencia del orden habitual en hormigón convencional, mezclar durante varios minutos la CCA N junto con los agregados gruesos para provocar la molienda y luego, proceder a la incorporación del resto de los materiales componentes del hormigón.

Inicialmente se plantearon dos secuencias de mezclado:

- a) para los hormigones con ceniza molida (M) y de referencia (C): en primer lugar se mezclan durante dos minutos los agregados junto con el agua, luego se incorporan el cemento y la CCA M (otros dos minutos), luego el aditivo (dos minutos) y finalmente el agregado fino (4 minutos). El tiempo total resulta igual a 10 minutos.
- b) para los hormigones con ceniza natural (N): en primer lugar se mezclan durante dos minutos los agregados junto con la CCA N, luego se incorpora el agua y el superfluidificante (dos minutos), luego el cemento (dos minutos) y finalmente el agregado fino (9 minutos). El tiempo total resulta igual a 15 minutos.

La primera etapa se realizó con pastones de 35 litros preparados en una hormigonera pequeña. Se comenzó con los hormigones de relación agua/ligante 0.55, realizando todos los pastones de cada serie durante la misma jornada. Debido a que se presentaron dificultades en alcanzar el asentamiento buscado en los hormigones elaborados con CCA N, que no pudieron ser solucionadas en base al aumento de la dosis de superfluidificante, en la serie 0.65 se planteó una nueva secuencia de mezclado para el caso de la CCA N, a saber:

- c) segunda alternativa de mezclado para hormigones con ceniza natural (N): en primer lugar se mezclan durante dos minutos los agregados junto con la CCA N, luego se incorpora el cemento (dos minutos), luego el agua (un minuto), el aditivo (un minuto) y finalmente el agregado fino (9 minutos). El tiempo total resulta igual a 15 minutos.

A partir de la implementación de la tercera secuencia de mezclado fue posible mejorar las propiedades en estado fresco del hormigón, razón por la cual se adoptó este mezclado para la serie de relación agua/ligante 0.45.

En la Tabla 2 se informan las proporciones de las mezclas, la secuencia de mezclado y las propiedades en estado fresco de cada uno de los hormigones elaborados. Los mismos se identifican en base a la relación agua/ligante y el tipo (N o M) y contenido de CCA (15 o 25 %). Los hormigones de referencia se identifican con la letra C. En el caso del hormigón 65-N15 se incluyen los resultados correspondientes a cada mezclado

En estado fresco se evaluaron el asentamiento, la temperatura del hormigón, el peso unitario y el contenido de aire incorporado.

Tabla 2. Proporciones y propiedades del hormigón fresco (pastones: 35 litros).

Serie 0.55		55-C	55-M15	55-M25	55-N15	55-N25
a/(c+CCA)		0.55				
Agua		173	173	173	173	173
Cemento		315	268	236	268	236
CCA N		-	-	-	47	79
CCA M	(kg/m ³)	-	47	79	-	-
Arena		860	839	825	822	797
Piedra		985	985	985	985	985
Aditivo		0.2	1.3	1.9	3.2	4.4
Secuencia de mezclado		a	a	a	b	b
Asentamiento	(mm)	110	100	100	60	0
Peso unitario	(kg/m ³)	2400	2410	2390	2330	2310
Aire	(%)	3.4	1.5	2.0	1.5	1.8
Temperatura	(°C)	20	21	21	20	21

Serie 0.65		65-C	65-M15	65-M25	65-N15	65-N25
a/(c+CCA)		0.65				
Agua		173	173	173	173	173
Cemento		266	226	200	226	200
CCA N		-	-	-	40	67
CCA M	(kg/m ³)	-	40	67	-	-
Arena		920	902	891	888	867
Piedra		990	990	990	990	990
Aditivo		0.2	0.8	1.1	2.7	4.0
Secuencia de mezclado		a	a	a	b c	c
Asentamiento	(mm)	100	100	70	0 70	0
Peso unitario	(kg/m ³)	2380	2370	2370	2350	2300
Aire	(%)	1.8	1.8	-	2.0 2.6	2.2
Temperatura	(°C)	23	23	23	23 23	24

Serie 0.45		45-C	45-M15	45-M25	45-N15	45-N25
a/(c+CCA)		0.45				
Agua		173	173	173	173	173
Cemento		385	327	289	327	289
CCA N		-	-	-	58	96
CCA M	(kg/m ³)	-	58	96	-	-
Arena		820	795	778	774	743
Piedra		985	985	985	985	985
Aditivo		0.2	1.0	1.5	3.8	5.8
Secuencia de mezclado		a	a	a	c	c
Asentamiento	(mm)	70	60	70	100	50
Peso unitario	(kg/m ³)	2350	2400	2370	2350	2320
Aire	(%)	2.6	1.9	2.0	2.5	2.5
Temperatura	(°C)	24	24	24	24	24

a: agregado grueso+agua (2^m); CCAM+cemento (2^m); aditivo (2^m); agregado fino (4^m).

b: agregado grueso+CCAN (2^m); agua (1^m); aditivo (1^m); cemento (2^m); agregado fino (9^m).

c: agregado grueso+CCAN (2^m); cemento (2^m); agua (1^m); aditivo (1^m); agregado fino (9^m).

Para valorar las propiedades del hormigón endurecido se moldearon cilindros de 100 x 200 mm para estudiar la evolución de resistencia a compresión y módulo de elasticidad entre 7 y 365 días, las probetas fueron curadas en cámara húmeda (90 % de humedad relativa, 20 ± 2 °C). Se incluyen en este artículo los ensayos hasta la edad de 90 días.

Una de las principales observaciones durante el proceso de elaboración de los hormigones fue que debido a la incorporación de la CCA N era necesario aumentar significativamente la dosis de aditivo y a pesar de ello no se alcanzaban los asentamientos buscados en especial para N25.

Aunque también se registraron incrementos con la ceniza molida (M) los citados incrementos en las dosis de superfluidificante fueron bastante mayores con las CCA N, superando el 1 % (dosis máxima recomendada por el fabricante). Esto se atribuye a una mayor absorción del agua y del aditivo debido a la porosidad de las partículas y a la forma irregular de las mismas. Se observó además que pasados algunos minutos se producía una gran exudación lo que daba lugar a una tendencia a segregar en el material.

Para la CCA N no sólo fue necesario aumentar la dosis de superfluidificante sino que, posiblemente debido al bajo nivel de molienda de las partículas de CCA, no se lograron las potenciales mejoras en la resistencia y otras propiedades del hormigón endurecido, tal como se verá más adelante. Mayores dosis de aditivo provocarían efectos secundarios inaceptables (demoras en el fraguado, segregación, etc.).

Por tal motivo se planteó la realización de una segunda etapa elaborando los hormigones en otra hormigonera que pudiera suministrar mayor energía de mezclado. Como se verá más adelante los nuevos pastones recientemente realizados han demostrado que el proceso de molienda se puede mejorar significativamente, esto ha permitido reducir las dosis de superfluidificante evitando efectos secundarios negativos y obtener un hormigón fresco de mejor calidad.

Primera etapa. Propiedades del hormigón endurecido

Sobre los hormigones elaborados en la primera etapa se realizaron ensayos de compresión a las edades de 7, 28 y 90 días. En los dos últimos casos se midieron las deformaciones en dirección axial a fin de calcular el módulo de elasticidad; para ello se realizaron tres ciclos de cargas hasta alcanzar el 40 % de la carga máxima.

Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 3 junto con los correspondientes valores del módulo de elasticidad, cada valor surge del promedio del ensayo de 4 probetas. En el caso del hormigón 65-N15 el valor que se informa corresponde al mezclado tipo "c"; al respecto cabe indicar que estos resultados fueron aproximadamente un 8 % mayores que los obtenidos con el mezclado tipo "b".

En la Fig. 2 se muestra el desarrollo de resistencia para los hormigones de las series 0.45, 0.55 y 0.65.

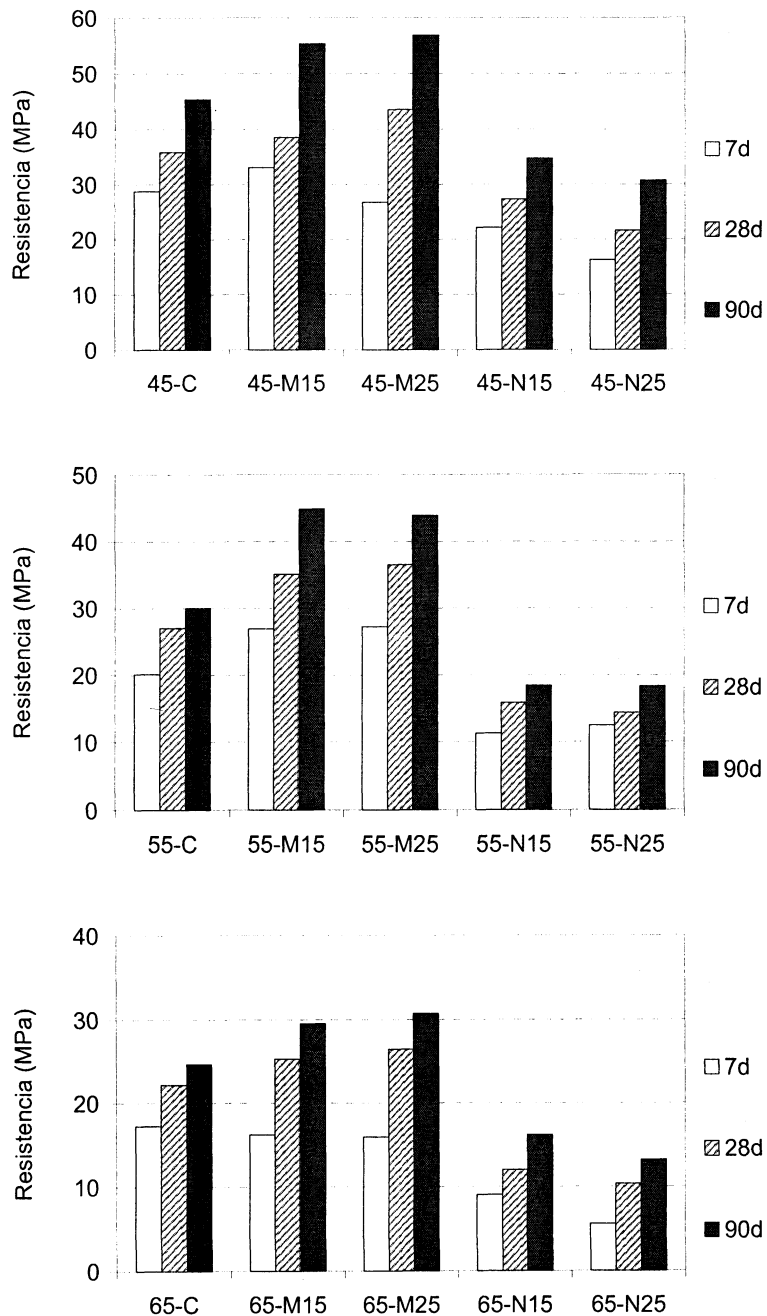


Figura 2. Resistencia a compresión.

Tabla 3. Primera parte. Propiedades del hormigón endurecido.

Serie 0.45		45-C	45-M15	45-M25	45-N15	45-N25
Resistencia a compresión	7 días	28.8	33.0	26.8	22.2	16.3
	28 días (MPa)	35.8	38.6	43.6	27.3	21.6
	90 días	45.4	55.3	56.9	34.7	30.7
Módulo de elasticidad	28 días (GPa)	33.0	30.4	29.4	27.4	24.2
	90 días	35.1	35.1	34.8	31.2	28.1

Serie 0.55		55-C	55-M15	55-M25	55-N15	55-N25
Resistencia a compresión	7 días	20.1	27.0	27.3	11.3	12.5
	28 días (MPa)	27.1	35.2	36.6	15.9	14.4
	90 días	30.1	44.9	43.9	18.5	18.4
Módulo de elasticidad	28 días (GPa)	31.6	35.2	31.9	20.9	16.9
	90 días	34.3	35.7	33.7	23.2	20.2

Serie 0.65		65-C	65-M15	65-M25	65-N15	65-N25
Resistencia a compresión	7 días	17.2	16.2	16.0	9.1	5.6
	28 días (MPa)	22.2	25.3	26.4	12.0	10.4
	90 días	24.7	29.5	30.7	16.2	13.2
Módulo de elasticidad	28 días (GPa)	26.5	25.7	25.3	16.6	14.0
	90 días	30.8	34.6	31.8	22.6	19.7

A partir de los resultados surge con claridad que las CCA M provocan un efecto positivo sobre la resistencia del hormigón superando marcadamente los niveles propios del hormigón sin cenizas, inclusive sustituyendo contenidos de cemento de hasta 25 % en peso. Los hormigones con CCA M alcanzaron niveles de resistencia comparables a los de los hormigones sin cenizas ya a la edad de 7 días y significativamente mayores a edades avanzadas. Esto se verifica con la ceniza optimizada (CCA M) para todas las relaciones agua/ligante analizadas. Por el contrario con la ceniza en estado natural (CCA N) los niveles de resistencia fueron menores que los del hormigón de referencia lo que confirmó que aún era necesario mejorar el proceso de mezclado-molienda de la CCA N para su real aprovechamiento.

En la Fig. 3 se presentan los resultados de resistencia aplicando el concepto de rendimiento de cada mezcla, esto es la relación entre la resistencia alcanzada por peso de cemento empleado. Se analizan los datos para cada una de las series y los valores promedio de todas ellas para las edades de 7, 28 y 90 días. Los resultados confirman las interesantes posibilidades que abre el uso de las CCA para la industria del hormigón con el consiguiente impacto ecológico positivo. Desde este punto de vista y considerando que el proceso de optimización de la CCA M requiere un costo adicional, se justifica profundizar en el desarrollo y forma de uso de la CCA N.

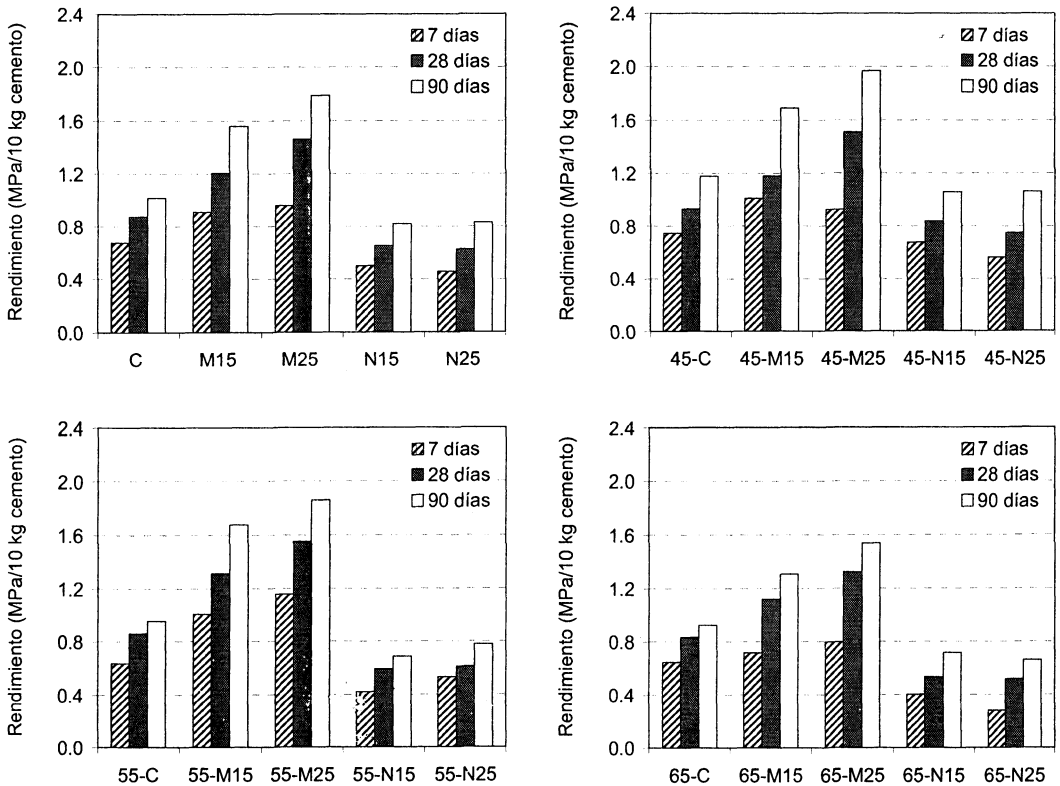
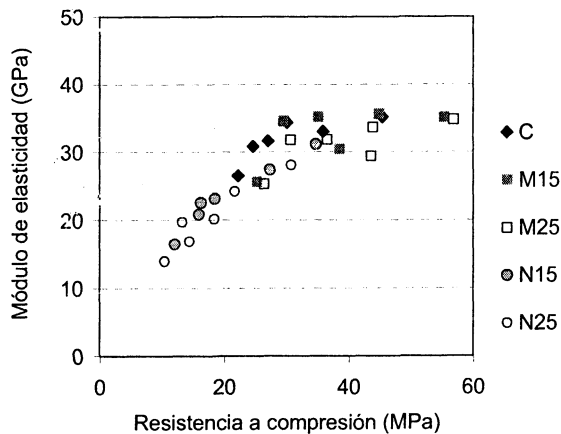


Figura 3. Rendimientos. Valores promedio para cada serie.



En la Fig. 4 se comparan los valores del módulo de elasticidad con la resistencia a compresión para los diferentes casos estudiados. Se observa que, como es de esperar, no existen marcadas diferencias debidas a la incorporación de la CCA. Debe considerarse que no existen grandes variaciones en los contenidos de agregado grueso y que si bien cuando se incorporaron CCA M se incrementó la resistencia de las mezclas, también se redujo ligeramente el volumen de agregado fino.

Finalmente cabe hacer notar que los resultados del hormigón endurecido indican que mientras la CCA M desarrolla su potencialidad, con la CCA N ocurre lo contrario. En consecuencia los resultados con CCA N se pueden considerar como un umbral inferior de las posibilidades de este material como adición mineral al hormigón, las propiedades resistentes debieran mejorar en la medida que se optimice el proceso de molienda durante el mezclado.

Segunda etapa

Los primeros resultados indicaron que era necesario modificar el proceso de mezclado si se deseaba alcanzar la efectividad de la CCA M. En una segunda etapa se exploraron otras secuencias y equipamientos de mezclado, se empleó una hormigonera de mayor volumen, incrementando en forma notoria la eficiencia del mezclado y molienda de la CCA N. Los resultados mejoraron significativamente cuando se extendió el tiempo de mezclado entre los agregados gruesos y la CCA N hasta 8 minutos y se redujo ligeramente la etapa final cuando se incorporaba el agregado fino; el tiempo total pasó de 15 a 16 minutos (mezclado d).

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos para hormigones de relación agua/ligante = 0.55, correspondientes a pastones de 100 litros. Las proporciones del hormigón fueron básicamente las mismas (fue posible realizar una pequeña reducción en el contenido de agua). Además del asentamiento, el peso unitario y el contenido de aire, se muestran los resultados del ensayo de remoldeo de Powers. Es interesante notar que para un mismo asentamiento la energía de remoldeo (número de golpes) se redujo en el caso de la CCA M, efecto atribuible a la influencia beneficiosa de las partículas más finas aportadas por la adición.

A diferencia de la primera etapa con estos hormigones se elaboraron probetas cilíndricas de 150 x 300 mm; en la Tabla 4 se incluyen los resultados de resistencia a compresión obtenidos a la edad de 28 días. Se observa que los valores alcanzados por C y M15 son consistentes con los correspondientes a la primera etapa donde los hormigones 55-C y 55-M15 presentaron resistencias de 27.1 y 35.2 MPa respectivamente sobre cilindros de 100 x 200 mm. Sin embargo en el caso del hormigón N15 bajo estas condiciones de mezclado, además de mejorar la trabajabilidad, se produjo un significativo incremento de resistencia alcanzando 30.3 MPa. Nótese que con este hormigón prácticamente se duplicó la resistencia obtenida en la primera etapa (15.9 MPa), se alcanzó el 90 % de la resistencia del hormigón con ceniza molida y se superó la resistencia del hormigón sin cenizas.

En síntesis los estudios muestran que es posible mejorar la CCA residual natural a partir de un ajuste en la secuencia de incorporación de los materiales al momento de realizar el mezclado, pero que dicho proceso deberá ser adecuadamente definido conforme el equipamiento disponible.

Tabla 4. Proporciones y propiedades del hormigón fresco (pastones: 100 litros).

a/(c+CCA): 0.55	C	M15	N15
Agua	170	170	170
Cemento	309	263	263
CCA N	-	-	46
CCA M (kg/m ³)	-	46	-
Arena	870	850	830
Piedra	990	990	990
Aditivo	0.20	1.1	1.6
Ciclo de mezclado	a	a	d
Asentamiento (mm)	90	90	90
Peso unitario (kg/m ³)	2390	2390	2330
Aire (%)	3.7	2.4	3.6
Temperatura (°C)	24	25	25
Remoldeo de Powers (número de golpes)	22	16	24
Resistencia a compresión 28 días (MPa)	27.0	33.3	30.3

a: agregado grueso+agua (2^m); CCAM+cemento (2^m); aditivo (2^m); agregado fino (4^m).

d: agregado grueso+CCAN (8^m); cemento (1^m); agua (1^m); aditivo (1^m); agregado fino (5^m).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los objetivos y algunos resultados del proyecto "Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz "in natura, que se desarrolla en forma conjunta entre el Centro de Tecnología GEPECON/UFMS Santa Maria, Brasil, la UDELAR, Montevideo, Uruguay y el LEMIT-CIC. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

Las cenizas de cáscara de arroz (CCA) son factibles de ser empleadas para sustituir cemento y pueden desarrollar una actividad puzolánica importante. Para ello se requiere un proceso de optimización que básicamente consiste en una molienda que puede realizarse en forma previa. Las cenizas optimizadas por esta vía (CCA M) demostraron excelentes propiedades en estado fresco y los hormigones donde se reemplazó hasta un 25 % cemento por CCA M incrementaron marcadamente su resistencia a partir de los 28 días.

También se puede utilizar para elaborar hormigones la CCA residual en estado natural (CCA N), aprovechando el proceso de molienda que tiene lugar cuando la misma se incorpora junto con los agregados gruesos como primera etapa de la secuencia de mezclado del hormigón. Sin embargo en las primeras pruebas dicho proceso no fue capaz de mejorar lo suficiente las propiedades de la ceniza, por lo que se incrementó en forma significativa la demanda de aditivo y no se alcanzaron los niveles de resistencia buscados.

En ajustes posteriores se consiguieron mejores resultados al utilizar una hormigonera de mayor capacidad y energía de mezclado y extender el tiempo inicial de mezclado del agregado grueso junto con la CCA N.

Los estudios muestran que es posible optimizar la CCA residual natural ajustando la secuencia de mezclado; dicho proceso debe ser adecuadamente definido conforme el equipamiento disponible.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto "Produção de concreto estrutural com cinza de casca de arroz in natura, sem beneficiamento" que cuenta con apoyo financiero del Programa Sul-Americano de Apoio às Atividades de Cooperação em Ciência e Tecnologia PROSUL-CNPq y se desarrolla con la coordinación general del Prof. Geraldo C. Isaia de la Universidad Federal de Santa Maria, RS, Brasil y las coordinaciones locales de la Prof. Gemma Rodriguez de Sensale de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Republica de la Republica (Montevideo, Uruguay) y del Prof. Raúl Zerbino del LEMIT-CIC (Argentina).

A CEMENTOS AVELLANEDA S.A. por su colaboración con el suministro de cementos para el desarrollo del programa experimental.

REFERENCIAS

- (1) Asociación Cultivadores de Arroz,
http://www.aca.com.uy/publicaciones/revista_38_situacion_regional.htm
- (2) Mehta, P.K. "Highly durable cement products containing siliceous ashes". United States Patent Number 5, 346, 548. Sep 1994, 15 p.
- (3) RILEM Committee 73-SBC, "Final Report: Siliceous by-products for use in concrete", Materials and Structures, 1988, Vol. 21, N° 121, pp. 69-80,
- (4) Rodriguez de Sensale, G. "Strength development of concrete with rice-husk ash". Cement and Concrete Composites, 2006, Vol. 28, N° 2, pp.158-160.
- (5) Malhotra, V.M. and Mehta, P.K., "Pozzolanic and Cementitious Materials". In: Advances in Concrete Technology, 1, Gordon and Breach Publ, Canada, 1996.
- (6) Isaia, G.C., Cervo, T., Duart, M. "Estudo exploratório da resistência à compressão de concreto com cinza de casca de arroz natural e moída". GEPECON, Centro de Tecnologia, UFSM. (Relatório interno), 2005.
- (7) Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G. and Moraes, R. "Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete". Cement and Concrete Composites, Barking, Essex, England, Vol. 25, N° 1, 2003, p. 65-72.
- (8) Isaia, G.C. and Gastaldini, A.L.G. "Effects on durability of HPC with very high levels of mineral additions and hydrated lime". In: IV International ACI/CANMET Conference on Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing, 2005, Olinda. Farmington Hills, USA: ACI, Vol. 1, 2005, p. 741-760.
- (9) Rodríguez de Sensale, G. "Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistencia e convencionais com cinza de casca de arroz". Tesis de Doctorado, 2000, Univ. Federal Rio Grande del Sur, Porto Alegre, Brasil, 181 p.
- (10) Giaccio, G., Rodriguez de Sensale, G. and Zerbino, R. "Fracture energy of rice-husk ash concrete". ACI SP 228-9, 2005, Ed: H. D. Russell, pp. 111-122.