

Propiedades físicas de un Hormigón de Alta Resistencia (HAR) con adición de Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA) como material puzolánico

Francisco Fabián Candia Ledezma ^a; María José Duarte ^b; Gustavo Chávez Chaparro ^c

^a Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay. ffcl93@gmail.com

^b Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay. majoooduarte@gmail.com

^c Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay. gustavo.chavez@fiumi.edu.py

Resumen

El Hormigón de Alta Resistencia (HAR) es utilizado actualmente a gran escala en obras ingenieriles de gran envergadura, debido a una mayor durabilidad, la disminución de secciones, costes y tiempos de ejecución, entre otros. En el Paraguay, una de las agroindustrias más importantes es la del arroz, que genera grandes cantidades de residuos, como la Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA). En este trabajo se determinaron las propiedades de un HAR elaborado con adición de CCA como material puzolánico. Se elaboraron mezclas con distintos contenidos de CCA en reemplazo de cemento, las cuales fueron sometidas a ensayos de consistencia, resistencia a compresión y capacidad de succión capilar. Para un contenido de 5% a 10% de CCA, se tuvieron notables aumentos de resistencia a la compresión de hasta un 20%, y un descenso de la capacidad de succión capilar, que implican una mayor durabilidad, acompañado de un menor costo de materiales. El uso de CCA es una alternativa interesante que puede disminuir residuos industriales e impacto ambiental.

Palabras clave: HAR, CCA, residuos.

Abstract

High-Strength Concrete (HSC) is currently used on a large scale in major engineering projects due to its greater durability, reduction in cross-sectional dimensions, and lower construction costs and execution times, among other advantages. In Paraguay, one of the most important agro-industries is rice production, which generates large quantities of residues such as Rice Husk Ash (RHA). In this study, the properties of an HSC incorporating RHA as a pozzolanic addition were evaluated. Concrete mixtures were produced with different RHA contents replacing cement, and were subjected to tests of consistency, compressive strength, and capillary water absorption. For RHA contents between 5% and 10%, significant increases in compressive strength of up to 20% were obtained, along with a reduction in capillary absorption, indicating improved durability and reduced material costs. The use of RHA represents an interesting alternative for reducing industrial waste and environmental impact.

Keywords: HSC, RHA, residues.



1. Introducción

El hormigón evoluciona constantemente desde su creación, adaptándose a las necesidades, a las estructuras cada vez más resistentes y a la economía. Por ello surgió el Hormigón de Alta Resistencia (HAR), que logra llegar a resistencias de 50 MPa a 100 MPa a los 28 días. Son consecuencia de elevada cantidad de cemento por unidad de volumen, con una muy baja relación agua/cemento (que obliga usar superplastificantes), cuidada selección de agregados y la adición de minerales [1].

Estas adiciones son materiales puzolánicos como la Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA), residuo que genera la agroindustria del arroz, que se caracterizan por poseer un alto contenido de sílice (SiO_2) amorfo, con un alto valor de superficie específica, morfología no definida y tamaño nanométrico [2].

El Paraguay es un gran productor de arroz y la infraestructura física aumenta con el tiempo. Por tanto, el uso del HAR con adición de CCA podría tener grandes beneficios técnicos, económicos y ambientales.

2. Objetivo

2.1. Objetivo general

Determinar las propiedades de un Hormigón de Alta Resistencia, elaborado con adición de Ceniza de Cáscara de Arroz como material puzolánico.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades de la ceniza de cáscara de arroz.
- Elaborar diferentes dosificaciones de hormigón con la utilización de la ceniza de cáscara de arroz.
- Determinar las propiedades físicas del hormigón de alta resistencia para diferentes dosificaciones.

3. Materiales y Métodos

3.1. Materiales para elaboración del HAR

Para las mezclas de hormigón elaboradas se utilizaron los siguientes materiales:

- Cemento: Portland de alta resistencia inicial (CPV-ARI) de industria brasilera.
- Agregado grueso: roca basáltica triturada de cantera regional, con tamaños máximos nominales de 19 mm y 9,5 mm.
- Agregado fino: arena silíceo lavada del río Paraná, de una arenera regional, de un tamaño máximo nominal de 2,40 mm.
- Aditivo químico: superplastificante o reductor de agua de alto rango de tercera generación, cuya base química son los policarboxilatos modificados en solución acuosa, contenido de sólidos del 40%.
- Aditivo mineral: ceniza de cáscara de arroz de una arrocería del distrito de Carmen del Paraná, Itapúa.
- Agua de amasado y curado: proveniente de la red sanitaria.

3.2. Producción y caracterización de CCA como material puzolánico

La CCA utilizada fue producto de la incineración de cáscara de arroz en un horno marca SUNCUE modelo SB-80 de 800.000 kcal/h (Figura 1). En este proceso se producen 36 kg/h de CCA como residuo, que es almacenada en una tolva, para luego descargarse en camiones.



Figura 1. Horno SUNCUE SB-80 y tolva (derecha) de almacenamiento de CCA.

La cáscara es incinerada entre los 600°C y 650°C, en el cual la sílice que compone la CCA se mantiene en estado amorfo. La CCA fue recolectada en una sola ocasión para garantizar su homogeneidad.

La CCA se sometió a un proceso de molienda, a fin de proporcionarle una finura ideal de un material puzolánico, y luego, a un proceso de cribado, para eliminar las partículas extrañas. Para la molienda se utilizó un molino de bolas de laboratorio de la marca ORTO-ALRESA (Figura 2), compuesto por cilindros de porcelana de 5 dm³, cargados con 150 satélites de porcelana, que giran a través de unos rodillos. Se determinó un tiempo ideal de 180 min para la finura deseada de la CCA.



Figura 2. Molino de bolas utilizado.

Para el proceso de cribado se utilizó un tamiz N° 30 (0,59 mm) de la serie ASTM, en el cual se introdujo la CCA y se lo sacudió de forma manual hasta eliminar partículas extrañas e impurezas, mayormente restos no calcinados de cáscara. En la Figura 3 se puede observar la cáscara antes y después de la molienda.



Figura 3. CCA en estado natural y luego de 180 minutos de molienda.

Posteriormente, se determinaron la densidad real, la pérdida al fuego y el contenido de sílice, características importantes de todo material puzolánico. Fueron determinadas según ASTM C311 2002 [3]. En la Figura 4 se observan equipos usados en los ensayos.



Figura 4. Horno mufla utilizado para el ensayo de pérdida al fuego y ensayo de densidad real de la CCA (izquierda).

3.3. Dosificación del HAR

El método de dosificación utilizado para la elaboración del HAR fue la guía de la ACI 211.4R [4]. En esta guía se proporcionan tres métodos que difieren en el material cementicio/puzolánico utilizado con el cemento Portland; cenizas volantes, humo de sílice y cemento de escoria de altos hornos. De la guía se seleccionó el método que utiliza cenizas volantes, la cual es incorporada al hormigón en porcentajes de reemplazo del material cementicio calculado, de igual forma a como se incorpora la CCA.

La resistencia característica buscada fue de 50 MPa, la cual condujo a una resistencia media, requerida por los cuerpos de prueba, de 60 MPa, utilizando [4] la ecuación:

$$f_{cm} = 1,1 f_{ck} + 5 \text{ (MPa)}$$

Donde;

f_{cm} : resistencia media a compresión a 28 días.

f_{ck} : resistencia característica a compresión a 28 días.

Se estimaron las cantidades de los materiales componentes de forma teórica, y éstas se ajustaron debido a la humedad y absorción reales de los agregados, por el cumplimiento o no de un asentamiento inicial preestablecido y por las características del superplastificante. Inicialmente se dosificó una mezcla básica, cuyo único material fue el cemento Portland, y luego, se repitió el mismo proceso para las mezclas, incorporándose la CCA (Tabla 1) en reemplazo de cemento de la mezcla básica.

Tabla 1. Mezclas dosificadas.

Mezclas	Contenido de CCA
Básica	0%
Complementaria 1	5%
Complementaria 2	10%
Complementaria 3	15%

3.4. Elaboración y determinación de las propiedades del HAR

Del hormigón fresco, como endurecido, se determinaron propiedades de consistencia, la resistencia a compresión simple, la capacidad y velocidad de succión capilar de agua.

La *consistencia* del hormigón fresco, para cada mezcla, fue determinada según sus asentamientos en el cono de Abrams, siguiendo el estándar ASTM C143 2015 [5].

Primeramente, se realizaron mezclas de prueba a fin de verificar que se cumpliera el asentamiento inicial preestablecido en el proceso de dosificación (Figura 5).

Se presentaron dos situaciones; la primera, el asentamiento verificado en el ensayo coincidía con el rango preestablecido, por lo cual no hubo cambios en la cantidad de agua de amasado de la mezcla; la segunda, el asentamiento verificado fue menor al rango preestablecido, por lo cual se elaboraron

mezclas de prueba con aumentos sucesivos de 3% en la cantidad de agua de amasado hasta verificarse el asentamiento deseado.



Figura 5. Prueba de verificación del asentamiento inicial.

También se realizaron ensayos de asentamiento a fin de encontrar el contenido óptimo de superplastificante para la mezcla básica, y utilizar este contenido en las demás mezclas complementarias a fin de analizar cómo afecta la incorporación de la CCA en la consistencia del hormigón fresco.

Se probaron contenidos de superplastificante (Figura 6) recomendados por el fabricante (Tabla 2) y el contenido óptimo fue aquel que no produjo segregación en la mezcla y cuyo valor fuera menor o igual a 250 mm.



Figura 6. Segregación en mezcla básica con alto contenido de superplastificante.

Tabla 2. Cantidades de superplastificante en porcentajes de masa de material cementicio para cada prueba realizada.

Prueba N°	Contenido de SP (%)
1	2,00
2	1,00
3	0,50
4	0,20

La *resistencia a compresión simple* fue determinada a partir de la rotura de series de cuerpos de prueba cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, a las edades de 7, 28 y 56 días, a fin de conocer el desarrollo de esta resistencia en las mezclas con CCA en comparación con la mezcla básica.

Para la elaboración del hormigón, la confección de los cuerpos de prueba, así como su curado, se siguió el estándar ASTM C192. 2002 [6], y para la rotura se siguió el estándar ASTM C39. 2003 [7].

Para cada edad se confeccionaron 3 cuerpos, totalizando así 9 cuerpos por cada mezcla estudiada y 36 cuerpos en total. Para la elaboración del hormigón se utilizó una hormigonera HORBACH de 400 dm³.

Para la rotura de los cuerpos se utilizó inicialmente una prensa electrohidráulica SOLOTEST de 150 tf (Figura 7) y debido al aumento considerable de la resistencia de los cuerpos con respecto a su edad, se utilizó luego, una prensa electrohidráulica MATEST de 250 tf. Ambas prensas, al momento de los ensayos, poseían certificación de calibración por parte del Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN).

La capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido, para cada mezcla, se determinó según la metodología del estándar IRAM 1871. 2004 [8], a fin de

evaluar la influencia de la CCA en la red capilar del hormigón, uno de los factores más influyentes en la durabilidad de éste.



Figura 7. Rotura de un cuerpo de prueba, indicándose la carga última de rotura.

Se utilizaron discos de 10 cm de diámetro por 5 cm de altura, originados del corte de cuerpos cilíndricos de igual diámetro por 20 cm de altura. El ensayo (Figura 8) consistió básicamente en colocar los cuerpos en contacto superficial con agua, y registrar el peso de estos en función del tiempo.



Figura 8. Discos en contacto superficial con agua.

Estas mediciones de peso se realizaron hasta que dos pesadas consecutivas dieron una diferencia de 0,1%. Con los datos obtenidos se definieron la capacidad de succión capilar, que es la máxima masa de agua por unidad de superficie que puede absorber el hormigón por capilaridad; y la velocidad de succión capilar, que es el ritmo al cual se produce esta absorción capilar de agua.

4. Resultados

4.1. Características de la CCA para la elaboración del HAR

La densidad de la CCA se halló entre 2 a 2,2 g/cm³ y coincide con los valores dados por la mayoría de autores que la han estudiado.

Los valores de pérdida al fuego y contenido de sílice cumplen satisfactoriamente las exigencias del estándar ASTM C618. 2005 [9], cuyos valores mínimos recomendados para un material puzolánico de clase N, como la CCA, son 10% y 70%, respectivamente. En la Tabla 3 están los resultados.

Tabla 3. Resultados obtenidos de los ensayos realizados a la CCA.

Característica	Valor
Densidad	2,18 g/cm ³
Pérdida al fuego	1,99%
Contenido de sílice	97%

4.2. Dosificación del HAR

En la Tabla 4 se presentan las dosificaciones finales, y que tienen en cuenta el estado de secado al horno de los agregados. En la cantidad de agua de amasado, está incluida la aportada por el superplastificante. Todas poseen relación agua/materiales cementicios igual a 0,36; contenido de superplastificante de 0,2% de masa de materiales cementicios;

y un asentamiento inicial (antes de la adición del superplastificante) de 25 a 50 mm.

En todas las dosificaciones, la cantidad de cemento supera los 500 kg/m³ de hormigón. Entre la mezcla básica y la de CCA de 15% existe una diferencia mayor a una bolsa de cemento (59 kg), lo que favorece a la disminución de los costos de elaboración.

Tabla 4. Dosificaciones finales de todas las mezclas, en kg/m³ de hormigón.

Material	Básica	CCA 5%	CCA 10%	CCA 15%
Cemento	574	559	525	515
CCA	0	29,5	58,5	91,0
Agua	209	214	212	221
Piedra 4ta	644	639	641	634
Piedra 5ta	395	391	393	389
Arena	611	578	574	529
Superplastificante	1,15	1,18	1,17	1,21

La CCA, al ser un material menos denso que el cemento, ocupa un mayor volumen, por ende, y según el método de dosificación elegido (que se basa en el método de los volúmenes absolutos), el volumen de arena disminuye para contrarrestar este efecto.

4.3. Determinación de las propiedades del HAR

Para la *consistencia* del hormigón fresco (Tabla 5), se tienen los asentamientos iniciales obtenidos (sin superplastificante) para cada mezcla, así como la cantidad de agua de amasado necesaria, para un rango de 25 a 50 mm, según lo recomendado por la guía de dosificación. En la Tabla 6 se tienen los asentamientos para cada contenido de superplastificante y en la Tabla 7 se tienen los asentamientos con el contenido óptimo.

Tabla 5. Asentamientos iniciales obtenidos y sus cantidades de agua de amasado.

Mezcla	Agua (kg)	Asentamiento (mm)
Básica	1,93	45
CCA 5%	1,96	25
CCA 10%	1,94	25
CCA 15%	2,05	35

Tabla 6. Asentamientos con distintos contenidos de SP (mezcla básica).

Prueba N°	Contenido de SP (%)	Asentamiento (mm)
1	2,0	Segregación
2	1,0	Segregación
3	0,5	Segregación
4	0,2	205

Tabla 7. Asentamientos de las mezclas con el contenido óptimo de superplastificante.

Mezcla	Asentamiento (mm)
Básica	205
CCA 5%	200
CCA 10%	195
CCA 15%	140

Hay cierta tendencia al aumento en la demanda de agua de amasado con respecto al aumento de CCA, para obtener un asentamiento dentro del rango deseado.

El contenido óptimo de superplastificante fue de 0,2% de material cementicio, valor que no produjo segregación, sino un asentamiento mensurable menor a 250 mm. Para un mismo contenido de superplastificante, el valor del asentamiento es inversamente proporcional al contenido de CCA de ésta, ya que influye negativamente en la trabajabilidad.

La Figuras 9, 10 y 11 resumen los resultados de la *resistencia a compresión simple*.

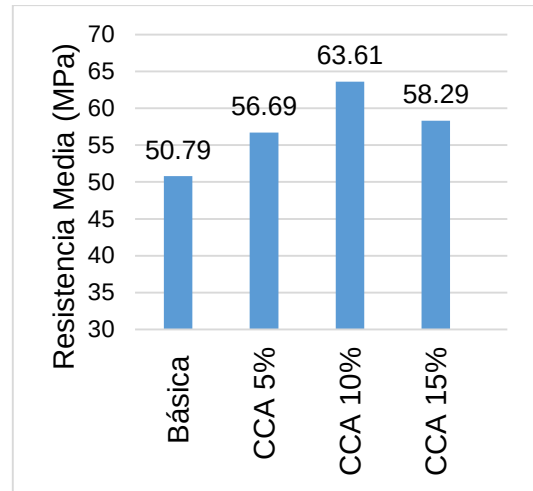


Figura 9. Resistencia media a compresión a los 7 días de edad, para todas las mezclas.

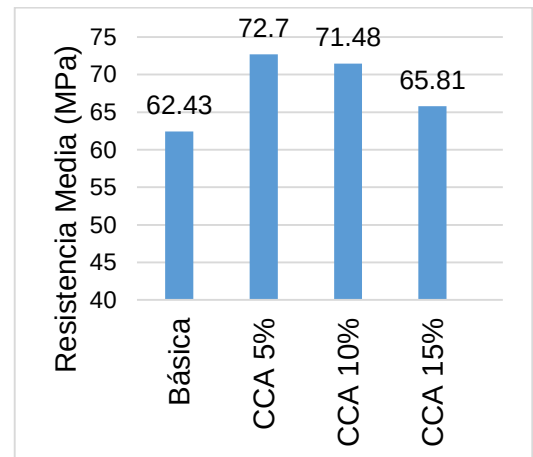


Figura 10. Resistencia media a compresión a los 28 días de edad, para todas las mezclas.

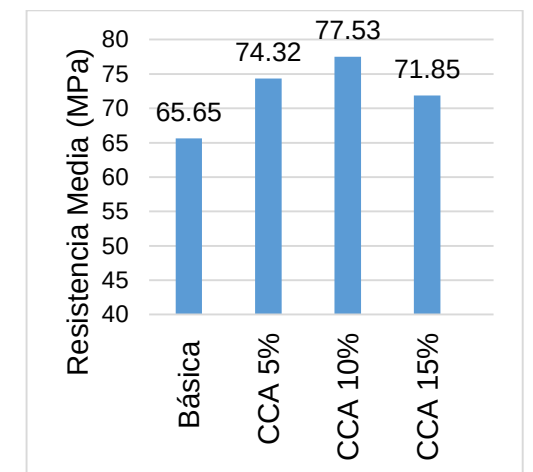


Figura 11. Resistencia media a compresión a los 56 días de edad, para todas las mezclas.

Es notable la contribución de la CCA en el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón, pues todas las mezclas complementarias tienen valores más altos de resistencia que la mezcla básica, en todas las edades en estudio, a pesar de poseer éstas, menor consumo de cemento Portland que la mezcla básica, debido al reemplazo de este material por la CCA (Figura 12).

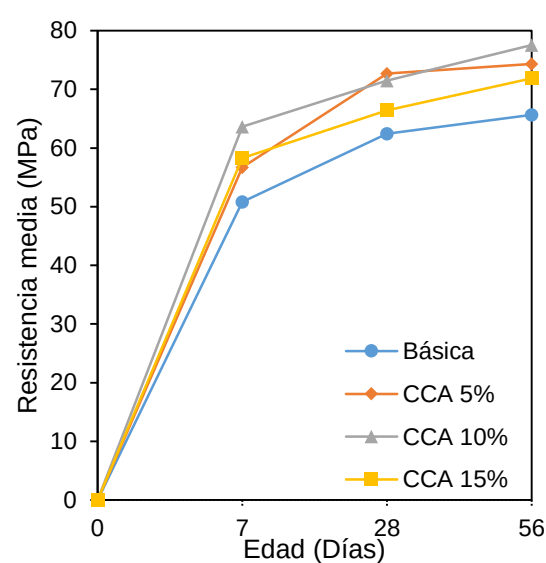


Figura 12. Desarrollo de la resistencia media a compresión de las mezclas en el tiempo.

A los 7 días de edad la CCA 10% fue la más favorecida, con un aumento notable del orden de 25%. A los 28 días, la mezcla CCA 5% aumentó la resistencia cerca del 16%, muy cercano a la mezcla CCA 10%, del orden de 14%. A los 56 días de edad, la mezcla CCA 10% obtuvo un aumento del 18% de resistencia con respecto a la básica, seguida por las mezclas de 5% y 15% de CCA. Se puede concluir que un contenido de CCA de entre 5% y 10% es el ideal, y que valores superiores al 10% no producirían un mayor aumento de la resistencia.

En la siguiente Tabla se tienen los resultados del ensayo de capacidad y velocidad de succión capilar.

Tabla 8. Ensayo de capacidad y velocidad de succión capilar de agua.

Mezcla	Capacidad de succión capilar (g/m ²)	Velocidad de succión capilar (g/m ² s ^{1/2})
Básica	1547	2,01
CCA 5%	1378	1,71
CCA 10%	1653	2,16
CCA 15%	1833	2,35

Tanto en la capacidad, como en la velocidad de succión capilar, la mezcla CCA 5% fue la única que obtuvo un valor menor, comparada con la mezcla básica. Por tanto, un contenido de 5% de CCA es el óptimo a fin de reducir la densidad de la red capilar del hormigón endurecido, y aumentar la durabilidad de éste.

5. Conclusiones

La CCA obtenida proporcionó buenas características puzolánicas, que pudieron comprobarse mediante el aumento de la resistencia media a compresión simple de las mezclas. La resistencia del HAR tuvo un aumento significativo con 5% y 10% de CCA. La capacidad y velocidad de succión capilar de agua para la mezcla de 5% de CCA tuvo una reducción del 11% en la capacidad de succión, favoreciendo la durabilidad. Actualmente la CCA es un residuo industrial de costo mínimo y su uso en el HAR cerraría el ciclo de la industria arrocera, logrando beneficios ambientales.

6. Referencias

- [1] A. M. Neville, "Properties of Concrete", 5th ed. Harlow, UK: Pearson Education, 2011.
- [2] C. Arcos, D. Pinto y J. Rodríguez. "La cascarilla de arroz como fuente de SiO_2 ". Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, vol. 41 p. 7-20, septiembre, 2007.
- [3] ASTM C 311 – 02. *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. West Conshohocken: ASTM International. December 10, 2002. 9p.
- [4] ACI 211.4R. *Guide for selecting proportions for High-Strength Concrete using Portland cement and other cementitious materials*. Farmington Hills: ACI Committee 211, December, 2008. 29p.
- [5] ASTM C143/C143M – 15a. *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. West Conshohocken: ASTM International. July 1, 2015. 4p.
- [6] ASTM C 192/C 192M – 02. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. West Conshohocken: ASTM International. August 10, 2002. 8p.
- [7] ASTM C 39/C 39M – 03. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken: ASTM International, July 10, 2003. 5p.
- [8] IRAM 1871:2004. Hormigón: Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido. Buenos Aires: Subcomité de Hormigones y sus aplicaciones del IRAM, 22 de diciembre de 2004. 16p.
- [9] ASTM C 618 – 05. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. West Conshohocken: ASTM International. July 1, 2005. 3p. -