

Caracterización del hormigón sostenible obtenido a partir de hormigón reciclado y puzolana artificial de ceniza de cáscara de arroz

Darío Alejandro Cáceres Ferreira ^a; Gustavo Francisco Chávez Chaparro ^b

^a Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación, Paraguay, dario.caceres@fiuni.edu.py

^b Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación, Paraguay, gustavo.chavez@fiuni.edu.py

Resumen

El trabajo de investigación se basó en el estudio de propiedades físicas y mecánicas de hormigones elaborados con adición de ceniza de cáscara de arroz (CCA) y árido reciclado (AR). Ambos son desechos a los que no se les da un uso final; siendo necesaria la investigación para el uso de estos materiales alternativos en hormigones y así mitigar el impacto ambiental que generan estos residuos, sin poner en riesgo la resistencia y durabilidad en las estructuras. Se dotó a la CCA de una adecuada finura para obtener una puzolana libre de impurezas; los áridos reciclados se obtuvieron mediante trituración manual y bajo un estricto control de reciclaje se definieron sus propiedades físicas que cumplieron con los requisitos para ser utilizado como sustituto parcial del árido grueso natural. Se elaboraron mezclas con distintos contenidos de CCA (5%, 10% y 15%) respectivamente, en reemplazo de la masa de cemento de la mezcla básica, junto con la utilización del árido reciclado, sustituyendo a un 20% en peso sobre el contenido total del árido grueso natural, lo que permitió comparar los resultados obtenidos con el hormigón convencional mediante los ensayos de consistencia, densidad, resistencia a compresión simple y resistencia a flexotracción. Los resultados finales indican que, en relación a las propiedades físicas presentaron una buena trabajabilidad y reducción en cuanto a su densidad. Sin embargo, en las propiedades mecánicas la mezcla elaborada solo con la utilización del 20% de árido reciclado presentaron un aumento significativo de resistencia a compresión y son aptos para el uso estructural del hormigón, mientras que para un contenido de 5% de CCA y 20% de árido reciclado se obtendría una resistencia a compresión del 85% del valor del hormigón convencional.

Palabras clave: ceniza, cáscara de arroz, puzolana, árido reciclado.

Abstract

The research work was based on the study of physical and mechanical properties of concrete made with the addition of rice husk ash (CCA) and recycled aggregate (AR). Both are waste that is not put to a final use; Thus, research and the use of these alternative materials in concrete are necessary to mitigate the environmental impact generated by these residues, and without jeopardizing the resistance and durability of the structures. The CCA was endowed with an adequate fineness to



obtain a pozzolan free of impurities; The recycled aggregates were obtained by manual grinding and under strict recycling control, their physical properties were defined, which met the requirements to be used as a partial substitute for natural coarse aggregate. Mixtures with different CCA contents (5%, 10% and 15%), respectively, were made to replace the cement mass of the basic mix, along with the use of recycled aggregate, substituting 20% by weight of the total content. of natural coarse aggregate, which made it possible to compare the results obtained with conventional concrete through tests of consistency, density, resistance to simple compression and resistance to flexotraction. The final results indicate that, in relation to the physical properties, they presented a good workability and reduction in terms of their density. However, in the mechanical properties, the mixture made only with the use of 20% recycled aggregate presented a significant increase in compressive strength and are suitable for structural use of concrete, while for a content of 5% CCA and 20 % of recycled aggregate, a compressive strength of 85% of the value of conventional concrete would be obtained.

Keywords: Ash, rice husk, pozzolana, recycled aggregate.

1. Introducción

Las cenizas de la cáscara de arroz son subproductos y residuos agroindustriales, que se obtienen por la incineración de la cáscara de arroz, utilizadas como alternativa de energía calorífica en las calderas para el secado de los granos, provocando un problema ambiental por ser poco sostenible su tratamiento y disposición final en la actualidad. Varias investigaciones han concluido que el uso de la ceniza de la cáscara de arroz, posee un gran potencial tecnológico y ecológico para ser utilizado como sustituto del cemento. Por otro lado, también se generan residuos de construcción y demolición, este problema ambiental sucede por el poco o nulo conocimiento de los planes de gestión de residuos en las obras de construcción; por eso este sector no puede permanecer ajeno a esta necesidad y debe dar respuesta con soluciones sostenibles, haciendo que su gestión, valorización y reciclaje sea una tarea de interés. Por esto, el

propósito de esta investigación es evaluar la posibilidad técnica de incorporar ceniza de cáscara de arroz y árido grueso reciclado, en la elaboración de hormigones, ya que el reto en nuestros tiempos es conseguir una producción de hormigón sostenible, apuntando al reciclaje y la eficiencia de estos materiales que actualmente son solo desechos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de un hormigón elaborado con la incorporación de ceniza de cáscara de arroz y árido reciclado.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físicas y geométricas de los áridos reciclados, provenientes de las probetas de hormigón ensayadas en laboratorio.

- Comparar las propiedades del árido reciclado con las propiedades del árido grueso natural.
- Establecer la proporción adecuada para la incorporación de la ceniza de cáscara de arroz y árido reciclado en el hormigón.
- Analizar la consistencia y densidad del hormigón elaborado con ceniza de cáscara de arroz y árido reciclado en estado fresco.
- Establecer las propiedades mecánicas del hormigón elaborado con ceniza de cáscara de arroz y árido reciclado en estado endurecido.
- Comparar los resultados obtenidos del hormigón elaborado con adición de ceniza de cáscara de arroz y árido reciclado, con el hormigón convencional.

3. Materiales y Métodos

3.1. Materiales

3.1.1. Adiciones Minerales

Ceniza de la cáscara de arroz

Es la adición activa más disponible actualmente, y fueron recolectadas siguiendo las recomendaciones bibliográficas para que cumplieran con los requisitos necesarios para su uso en la elaboración del hormigón. La ceniza de la cáscara de arroz se obtuvo de una industria arrocera ubicada en la ciudad de Carmen del Paraná, Departamento de Itapúa. La temperatura de quema de la cáscara de arroz se encontraba entre los 600°C y 630°C, un rango ideal para que el contenido de sílice se mantenga en estado amorfo, y así, favorecer su reactividad puzolánica. Incluyendo los tratamientos de cribado y molienda manual con la finalidad de obtener una puzolana libre de impurezas y de alta reactividad.



Fig. 1: Ceniza de cáscara de arroz.

Tabla 1: *Características de la CCA.*

Descripción	Unidad	Resultado
Densidad	gr/cm ³	2,18
%PF	%	1,99
SiO ₂	%	97

Fuente: Candia, Duarte, 2018.

3.1.2. Áridos

Tipología de los áridos

Árido grueso reciclado (AR)

Se utilizó árido reciclado proveniente de las probetas de hormigón que fueron ensayadas con anterioridad; las mismas se encontraban en el Laboratorio de Materiales de Construcciones Civiles (LMCC), de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Itapúa. Estas probetas fueron sometidas a un proceso de trituración manual, y luego a un cribado para su posterior caracterización. Se tuvieron en cuenta algunas condiciones: fueron utilizadas probetas de dimensiones 10x20 cm para facilitar el trabajo de trituración manual; por recomendación de la EHE-08 [1], se escogieron probetas con resistencia característica igual o superior a 21 MPa, y se descartaron aquellas probetas que contenían aditivos, fibras o cualquier otro tipo de adición. Se recolectaron 70 kg de árido reciclado.



Fig. 2: Probetas de hormigón.

Árido grueso natural (AN)

Se utilizó como agregado grueso roca basáltica triturada proveniente de la Cantera El Camino de la ciudad de San Juan del Paraná, Departamento de Itapúa. Se adquirió un tipo de agregado denominado “triturada 4ta”, cuyo tamaño máximo nominal ronda los 19 mm.

Árido Fino (AF)

Se utilizó arena lavada de río, proveniente de la Arenera San Roque de la ciudad de Encarnación, Departamento de Itapúa. Las propiedades del árido reciclado, árido grueso natural y árido fino, se determinaron a través de las normativas americanas que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Normas utilizadas en la caracterización de los áridos.

Propiedades	Referencia	Tipología
Densidad y absorción.	ASTM C127 ASTM C128	AR, AN AF
Peso unitario	ASTM C29	AR, AN, AF
Granulometría	ASTM C136	AR, AN, AF
% Humedad	ASTM C566	AR, AN, AF

Fuente: propia.

3.1.3. Cemento

Se utilizó Cemento Portland Compuesto CP II – C32 Yguazú de industria paraguaya, en presentaciones de 50 kg, con sello de conformidad del Organismo Nacional de Certificación del INTN. Se realizó el ensayo de densidad real según ASTM C188 [2], arrojando un valor de 2,90 gr/cm³.

3.2. Plan de trabajo experimental

Para dar cumplimiento a los objetivos del trabajo, se diseñó el siguiente plan de trabajo experimental:

3.2.1. Dosificación del hormigón

Para la determinación de las cantidades de los materiales a utilizar en la elaboración del hormigón, se utilizó la normativa ACI 211.1 – 91 [3], y la resistencia característica seleccionada para el hormigón convencional fue de 21 MPa a los 28 días de edad, con un asentamiento establecido de 10±2 cm. Se adoptó la dosificación por peso para los materiales, y se elaboraron 5 (cinco) mezclas: una convencional y cuatro complementarias, la primera contempló únicamente la utilización de árido reciclado sustituyendo a un 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso natural. Las siguientes mezclas restantes incluyeron distintos contenidos de ceniza de cáscara de arroz (5%, 10% y 15%) expresados como porcentaje de reemplazo del peso de cemento, luego teniendo en cuenta su densidad, se ajustó el valor del árido fino, que fue calculado por el método del volumen absoluto y se mantuvo constante la utilización del 20% de árido reciclado. El ACI 211.1 – 91 menciona que cuando se utilizan materiales puzolánicos, debe considerarse la relación agua/cemento + materiales puzolánicos, es decir, $a/(c+p)$ en lugar de la

tradicional relación agua/cemento, a/c. Y con el fin de mantener la misma relación a/c y a/(c+p) en las 5 mezclas, se consideró la equivalencia por peso de materiales puzolánicos, haciendo $a/c = a/(c+p)$, seleccionando previamente como relación a/c = 0,54, que está determinada por requisitos de resistencia y durabilidad. La cantidad de agua utilizada estuvo en función del tamaño máximo de agregado grueso natural y del asentamiento deseado, con un contenido de cemento de 370 kg/m^3 que permitiese lograr una relación agua/cemento de 0,54. La masa de la ceniza de cáscara de arroz de cada mezcla complementaria, fue obtenida multiplicando la masa del material cemento (M_{C+P}) por el porcentaje de sustitución correspondiente. En consecuencia, la masa restante del material cementoso corresponde a la masa del cemento.

Tabla 3: Proporciones finales en l y kg/m^3 de hormigón.

Mat	HC	HR 20	HR 5-20	HR 10- 20	HR 15-20
Cem	370	370	351,5	333	314,5
CCA	0	0	18,5	37	55,5
AF	873	873	870	864	859
AN	966	773	773	773	773
AR	0	200	200	200	200
Agua	200	201	201,4	201,5	201,6
a/c	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54

Fuente: propia.

3.2.2. Elaboración del hormigón

Las distintas mezclas de hormigón fueron elaboradas siguiendo la metodología del estándar ASTM C192 [4]. El hormigón se elaboró por medios mecánicos, utilizando una

hormigonera tipo tambor de 400 dm^3 de capacidad.

3.2.3. Formas, dimensiones y cantidades de probetas

Se definieron los moldes de las probetas según la norma UNE 83.301 [5]. Los cuerpos de pruebas cilíndricos utilizados para la rotura a compresión, fueron de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura. Y en caso de los prismas utilizados para la rotura a flexotracción, fueron de arista 10 cm y longitud 40 cm. En total se elaboraron 90 cuerpos de pruebas, 9 para cada mezcla, 3 para cada edad de rotura seleccionada.



Fig. 3: Moldes para CPs.

3.2.4. Ensayos realizados

La fase experimental se llevó a cabo mediante dos etapas (Etapa 1 y Etapa 2). Todos los ensayos se realizaron de acuerdo a las especificaciones de las normativas ASTM y UNE.

Etapa 1

En esta etapa se realizaron los ensayos al hormigón fresco: Consistencia y Densidad. Consistencia: fue determinada por el ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams, siguiendo la metodología del estándar ASTM C143 [6]. Para lo cual se introdujo el hormigón en tres capas de alturas sensiblemente iguales, compactando cada capa a razón de 25 golpes con una barra metálica de 16 mm de diámetro y 60 cm de

longitud. Se desmoldó inmediatamente, y se midió la altura de descenso del hormigón por referencia a una regla horizontal colocada sobre el cono.



Fig. 4: Asentamiento del hormigón en el cono de Abrams.

Densidad: se determinó según la norma española UNE - EN 12350-6 [7]. Se utilizó un molde rígido y estanco. Se rellenó en tres capas de alturas sensiblemente iguales, compactando cada capa a razón de 25 golpes distribuidos uniformemente. Luego se determinó la masa del hormigón restando, de la masa total, la masa del molde y dividiendo por el volumen del molde. De esta manera se obtuvo la densidad del hormigón en estado fresco, que se expresa en kg/m^3 .

Cabe resaltar que, las probetas destinadas al control de calidad de la resistencia del hormigón fueron removidas de sus moldes después de 24 horas. Las mismas se mantuvieron en condiciones de humedad, mediante inmersión en agua (pileta de curado) hasta la edad de ensayo correspondiente.

Etapa 2

En esta etapa se realizaron los ensayos de rotura a compresión simple y a flexotracción del hormigón convencional y hormigón reciclado.

Resistencia a compresión simple: se procedió según la metodología estándar ASTM C39 [8]. Para el mismo fue utilizada una prensa electrohidráulica de la marca SOLOTEST con capacidad de 150 Tn. El ensayo se realizó con cabezales de neopreno y se llevó a la prensa hasta su rotura, registrando su valor. Se calculó la tensión del hormigón por la siguiente fórmula $\sigma = \frac{P_c}{A_p}$, siendo P_c carga de rotura y A_p sección transversal de la probeta.



Fig. 5: Ensayo de rotura a compresión.

Resistencia por flexotracción: se realizó según la norma española UNE – EN 12390-5 [9]. La prensa fue adaptada para el ensayo a flexotracción. Las probetas se rompieron a flexión mediante la aplicación de dos cargas iguales y simétricas, ubicadas en los tercios de la luz, siendo la luz de ensayo igual a 30 cm. La aplicación de cargas se compuso de dos rodillos de acero de 20 mm de diámetro, y otros dos para el apoyo de la probeta. La resistencia a flexotracción se calculó por la siguiente fórmula $F_{ctf} = \frac{3F}{a^2}$, siendo $F = 2P$ la carga total aplicada y a la arista, en MPa.



Fig. 6: Ensayo de rotura a flexotracción.

4. Resultados

Propiedades de los áridos

La Tabla 4 muestra un resumen de las propiedades con las que se evaluaron a los áridos, especialmente la comparación hecha entre el árido grueso natural y árido reciclado.

Tabla 4: *Propiedades de los áridos.*

Propiedades	AN	AR	AF
TMN (mm)	19	19	0,63
M. Finura (mm)	3,7	3,3	2,85
Densidad real (kg/m ³)	2940	2580	2630
Peso unit. (kg/m ³)	1540	1270	1504
%Humedad	1,26	4,99	3,25
%Absorción	2,34	6,79	1,44
%Vacíos	47,73	53,68	-

Fuente: propia

La EHE – 08 en su Art. 28 del Anejo 15, menciona que el tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4 mm, por lo tanto, el árido reciclado obtenido es aceptable para utilizar en la elaboración de nuevos hormigones. Los valores del peso específico y peso unitario del árido reciclado son

inferiores, 12% y 17% menos respectivamente que los áridos gruesos naturales, debido a que su textura superficial es mucho más rugosa, a causa del mortero adherido. Pero estos valores podrían variar dependiendo del método de trituración empleado, de la calidad del hormigón y reciclado del material. La misma norma también señala que, la absorción no deberá ser superior al 7% para áridos reciclados, y adicionalmente el árido grueso natural deberá tener una absorción no superior al 4,5%.

Etapa 1

Consistencia: el ensayo fue determinado para cada tipo de mezcla de hormigón. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: *Asentamientos obtenidos.*

Mezcla	Asent. (cm)	Consistencia
HC	11	Fluida
HR 20	12	Fluida
HR 5-20	9	Blanda
HR 10-20	8	Blanda
HR 15-20	10	Fluida

Fuente: propia.

Se observa una disminución del asentamiento no progresivo, pero sí existente, y en consecuencia varía su consistencia para una misma relación a/c y/o relación a/(c+p). Esto debido al aumento del volumen del hormigón generado que responde a la cantidad de áridos reciclados, por su mayor porcentaje de absorción, su geometría y porosidad, como así también el reemplazo de la masa del cemento por la ceniza de la cáscara de arroz en diferentes proporciones. En líneas generales han presentado una muy buena trabajabilidad.

Densidad: se analizó la densidad del hormigón en estado fresco para cada tipo de mezcla estudiada, con el fin de conocer el índice de uniformidad del hormigón y que repercute en su consistencia. Se han registrado tres lecturas para luego obtener la densidad promedio. Los resultados se muestran en la siguiente figura.

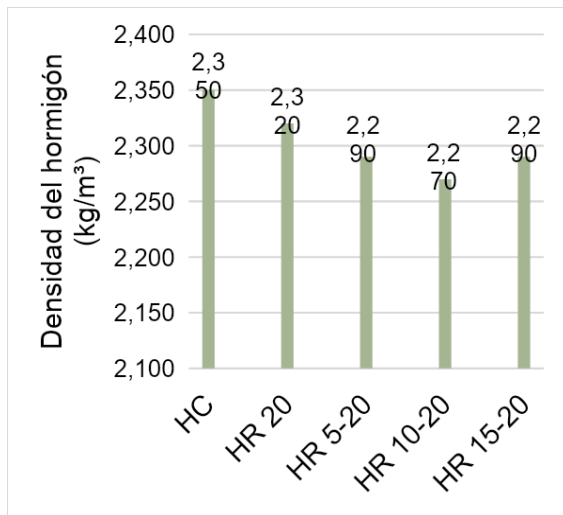


Fig. 7: Densidad del hormigón fresco.

Se observa una disminución de la densidad del hormigón en todas las mezclas respecto al hormigón convencional, esto puede deberse a que los áridos reciclados y la ceniza de la cáscara de arroz, son materiales menos densos que los convencionales, influyendo directamente en el hormigón fresco y repercutiendo en su consistencia.

La reducción porcentual de la densidad de las diferentes mezclas de HR 20, HR 5-20, HR 10-20 y HR 15-20, en relación al hormigón convencional fueron de 1,28%, 2,55%, 3,40% y 2,55% respectivamente, observado en la Fig. 7.

Etapa 2

Resistencia a compresión simple: se visualiza gráficamente el proceso de la resistencia a compresión de cada una de las mezclas de

hormigones elaborados, con respecto al tiempo posterior a su elaboración.

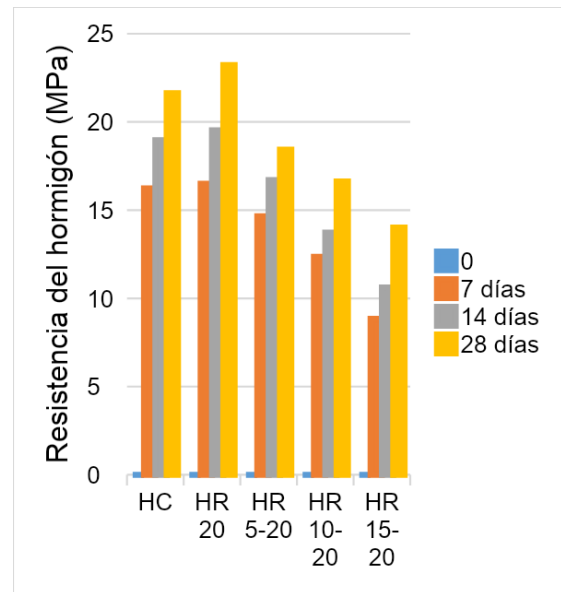


Fig. 8: Resistencia a compresión de los hormigones.

En los resultados obtenidos experimentalmente se comprobó, como se puede ver en la Fig. 8, que el hormigón elaborado con 20% de árido reciclado y sin adición (HR 20), tuvo un claro desarrollo y aumento de la resistencia a compresión en todas las edades, con relación al hormigón convencional. Esto puede ser debido a una serie de factores, en primer término, podría deberse a la elección de un hormigón original de mayor resistencia, como árido reciclado, considerando además que presenta una muy buena granulometría, como consecuencia de un buen proceso de trituración manual, lo que permitió que se ocupen mejor los espacios vacíos, formando un material más compacto capaz de transmitir mejor los esfuerzos, mejorando así el desempeño final del hormigón, obteniéndose valores admisibles para hormigones estructurales. Otro aspecto a considerar fue que se han reciclado áridos

en buenas condiciones, desechando aquellos que presentaban cualquier tipo de material extraño adherido a la superficie del árido. Mientras que aquellos hormigones reciclados elaborados con adición de la ceniza de la cáscara de arroz, han presentado valores de resistencia a compresión menores que la del hormigón convencional en todas las edades. Esto puede deberse a que el proceso de molienda manual de la CCA no fue del todo eficaz, probablemente se requiera la utilización de una molienda mecanizada para obtener una CCA más fina y reactiva. Por otro lado, podría deberse a que se ha alcanzado el límite de la reducción del principal material cementante, que es el cemento portland, y esto no permite una reacción puzolánica significativa de la CCA. La resistencia media a compresión del hormigón a los 28 días de edad en relación a un hormigón convencional de 21,63 MPa fueron las siguientes: para el hormigón elaborado HR 20 fue de 23,22 MPa, equivalente al 7,32% de aumento, para el hormigón HR 5-20 fue 18,43 MPa, equivalente al 14,82% de reducción, para el hormigón HR 10-20 fue de 16,63 MPa, equivalente al 23,13% de reducción y para el hormigón HR 15-20 fue de 14,01 MPa, equivalente al 35,24% de reducción.

Resistencia a flexotracción: En la Fig.9 se puede observar el proceso de la resistencia a flexotracción de cada uno de los hormigones elaborados, con respecto al tiempo posterior a su elaboración.

En los resultados obtenidos experimentalmente se comprobó que, a los 28 días de edad el hormigón elaborado con 20% de árido reciclado y 10% de adición de ceniza de cáscara de arroz (HR 10-20) presentó un ligero aumento en la resistencia a

flexotracción, resultado interesante para valorar el comportamiento del hormigón con estas adiciones en relación al hormigón convencional, que sufrió un descenso importante a los 28 días de edad. También se resalta el comportamiento del hormigón HR 5-20 que tuvo una mejora interesante de su resistencia a los 28 días de edad, con un valor similar a los dos primeros tipos de hormigones ya mencionados.

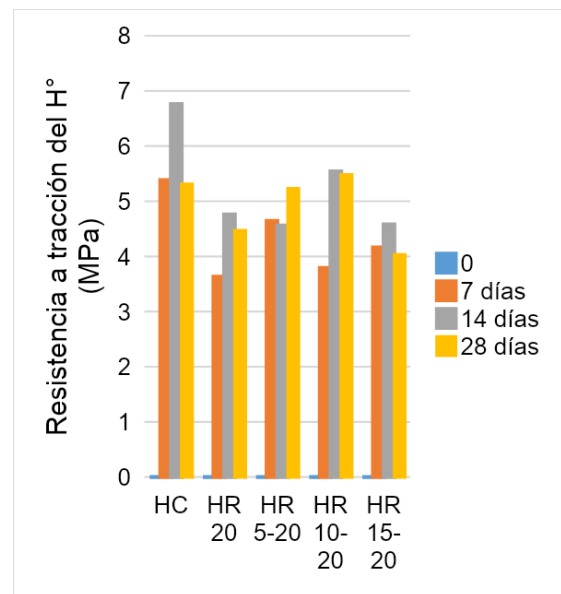


Fig.9: Resistencia a la flexotracción de los hormigones.

Mientras que el hormigón elaborado con 20% de árido reciclado, HR 20 que tuvo un buen desempeño a la resistencia a compresión, en esta ocasión, ha presentado valores inferiores al hormigón convencional. Esto puede ser debido al tipo de árido utilizado, ya que éstos presentan ciertas ventajas en relación a las propiedades de adherencia, pero al no contar con el acero de refuerzo y al someterse a este tipo de ensayo, esta propiedad pasa desapercibida.

La resistencia media a flexotracción del hormigón a los 28 días de edad con respecto

a un hormigón convencional de 5,31 MPa, fueron las siguientes: para el hormigón elaborado HR 20 fue de 4,47 MPa, equivalente al 15,87% de reducción, para el hormigón HR 5-20 fue de 5,23 MPa, equivalente al 1,57% de reducción, para el hormigón HR 10-20 fue de 5,48 MPa, equivalente al 3,20% de aumento y para el hormigón HR 15-20 fue de 4,03 MPa, equivalente al 2% de reducción.

5. Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Los áridos reciclados cumplieron con los requisitos mínimos impuestos por la EHE-08 (Instrucción de Hormigón Estructural) para el uso en hormigón estructural, utilizando un 20% de árido reciclado en reemplazo del árido grueso natural. Esto fue posible gracias a un buen proceso de trituración, además de un selectivo y riguroso control de reciclaje.
- Gracias a los resultados de resistencia a compresión simple, se concluye que el hormigón elaborado con 20% de árido reciclado (HR 20) es apto para el uso estructural del hormigón, y que también contribuye a la acumulación de puntos para la certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), que es un sistema de certificación internacional para edificios sostenibles. Aunque su uso debe ser estudiado y analizado según las especificaciones técnicas de cada proyecto y las tecnologías disponibles para la obtención de los áridos reciclados.
- Considerando la utilización de la ceniza de la cáscara de arroz, el hormigón HR5-20 fue el que presentó un mejor comportamiento mecánico, con el cual se obtendría una resistencia a compresión del 85% del valor del hormigón convencional, pudiendo ser utilizados como alternativas a elementos no estructurales como: mamposterías prefabricadas, en contrapisos como material relleno en lugar de suelo compactado, relleno de zanjas, subbase de cimentación, subbase de pavimentación para tránsito liviano, fabricación de tuberías de hormigón, de postes para alambrados, cordones cuneta, canalones y para cubiertas tipo losas no transitables.
- Utilizar estos materiales para la elaboración de hormigones sostenibles trae consigo un aspecto positivo desde el punto de vista ecológico, ya que el uso de puzolanas obtenido a partir de la ceniza de la cáscara de arroz contribuye a la conservación del medio ambiente, ya que se reduce la cantidad de residuos generados por las industrias arroceras. Y el reciclaje del hormigón reduce la explotación de los recursos naturales, como así también se reducen los desechos de hormigón en vertederos habilitados o ilegales, preservando el medio ambiente.
- Este trabajo conduce y promueve a cumplir 2 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU; el 9 de Industria, Innovación e Infraestructura, y el 12 de Producción y Consumo responsables; este objetivo promueve la práctica de las 3R, reducir, reutilizar y reciclar en nuestras actividades cotidianas.

6. Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias a la orientación y supervisión del Ing. Civil Gustavo Chávez Chaparro; a la empresa ARROSUR S.R.L por la colaboración de las muestras de cenizas de cáscara de arroz; a los ingenieros civiles Fabián Candia, María Duarte y Débora Lezcano, que contribuyeron con informaciones y datos valiosos para la elaboración de este trabajo de investigación.

7. Referencias

- [1] EHE – 08, *Instrucción de Hormigón Estructural: con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente del Hormigón*, 5ta ed., Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento, 2011.
- [2] American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Density of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM C 188. West Conshohocken, PA, 2014.
- [3] ACI Committe 211, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1991.
- [4] ASTM C 192, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [5] UNE – EN 83301 – 5. *Ensayos de hormigón fresco. Fabricación y conservación de probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2005.
- [6] ASTM C 143, *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [7] UNE – EN 12350 – 6. *Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la*

densidad. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2006.

[8] ASTM C 39, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

[9] UNE – EN 12390 – 5: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas*. Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2001. –