

Propiedades mecánicas, eléctricas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados

Mechanical, electrical, and durability properties of concrete with recycled aggregates

JORGE ALEJANDRO LAVERDE LAVERDE¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniera civil. Maestría en Estructuras. Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación en Estructuras y Materiales.

jorge.laverde@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/12/2016 Aceptado: 25/03/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

El propósito de este artículo es presentar la valoración de algunas de las propiedades eléctricas, mecánicas y de durabilidad de mezclas de concreto con remplazo de agregado grueso por agregados de concreto reciclado (ACR). El ACR usado en las mezclas de los ensayos se produjo a partir de la trituración de probetas de concreto, las cuales se habían ensayado en el laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Se evaluaron ocho mezclas con cuatro contenidos de agregados reciclado (0 %, 25 %, 50 % y 100 %) y dos valores de relación agua/cemento (0,5 y 0,6). Entre las propiedades analizadas están la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistividad, impedancia, velocidad de pulso ultrasónico, permeabilidad al ion cloruro, carbonatación y sortividad. Los resultados de los ensayos indicaron claramente que en las mezclas con mayor porcentaje de agregado reciclado, los resultados del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión son más bajos que para concretos con agregado natural. La resistencia a la compresión de un concreto con 100 % de ACR tiene una reducción estimada del 20 al 25 %, con respecto a un concreto convencional. Paralelamente, las propiedades eléctricas y la durabilidad medida mediante ensayos de resistividad, impedancia, sortividad y permeabilidad al ion cloruro, y sortividad, se ven afectadas con el aumento del porcentaje de agregado reciclado y la relación agua/cemento.

Palabras claves: agregados reciclados, resistencia a la compresión, propiedades mecánicas, durabilidad, permeabilidad al ion cloruro, resistividad, impedancia.

Abstract

The purpose of this study is to investigate the behavior of Recycled Aggregate Concrete with Recycled Concrete Aggregates (RCA), through the measure of some electrical, mechanical, and durability properties of this material. The recycled aggregates used were obtained from crushing leftover concrete specimens from the laboratory at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. The replacement levels of RCA were 0%, 25%, 50% and 100%, in eight separate mixtures, using two different water/cement (w/c) ratios (0,5 and 0,6). The properties tested were the compressive strength, modulus of elasticity, resistivity, impedance spectrometry, ultrasonic pulse velocity, electrical indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Carbonation, and rate of absorption measurement. The test results indicate that modulus of elasticity and the compressive strength of recycled concrete aggregate decreased with the increase of the amount of aggregates in the mixture. The compressive strength for a 100% RCA mixture was reduced by 20% - 25%. Furthermore, it was confirmed that electrical and durability properties as resistivity, impedance, electrical indication of concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, and rate of absorption measurement are significantly affected by both amount of RCA and water/cement (w/c) ratio.

Keywords: recycled aggregates, compressive strength, electrical, mechanical and durability properties, resistivity, impedance.

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Bogotá se genera anualmente un volumen estimado de 12.000.000 m³ de escombros, por parte del sector público y el sector privado (Coambiente S.A., octubre de 2009). Al hacer proyecciones para un horizonte de doce años, según estudios de la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), a una tasa de crecimiento del 4 %, el estimado de escombros que va a generarse en Bogotá es de 215 millones de m³ en el horizonte de proyección mencionado.

Teniendo en cuenta que en la ciudad no existe un manejo integral de escombros y que la capacidad instalada para recepción de escombros es limitada, el Distrito desarrolló una propuesta para la gestión integral de los residuos derivados de la construcción, demolición y remodelación en la ciudad, mediante la Resolución 1115 del 26 de septiembre de 2012, en la cual se adoptan lineamientos técnico-ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital y se establecen obligaciones para los actores que participan en la producción de escombros, entre éstos las empresas constructoras, entidades públicas y empresas privadas.

Ya en otros países del mundo se ha desarrollado una gestión integral en el manejo de escombros. Tal es el caso de España, donde se generan cada año entre 30 y 40 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD), previamente utilizados en construcción (Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición, noviembre de 2010, p. 6.), Estados Unidos, Dinamarca, Holanda, Gran Bretaña, Alemania y Japón, que poseen programas para reciclar materiales de construcción con la creación de plantas de tratamiento. En cuanto a los países de América Latina, el primer país que contó con una planta de reciclaje de RCD, por medio de la resolución expuesta por el Conama en el año 2002, fue Brasil, la cual se encarga específicamente de los residuos de construcción civil; a partir de esto, sus municipios han venido retomando sus acciones, como São Paulo, Salvador y otros (Cortina Ramírez, 2007).

Por lo tanto, es importante que en Colombia se tomen acciones tendientes a minimizar la carga de escombros en las ciudades, siguiendo los modelos implementados en otros países. Para tal efecto, el concreto cumple un papel clave, ya que en él se pueden incorporar los agregados de concreto reciclado (ACR).

Sin embargo, es de suma importancia evaluar las propiedades mecánicas y de durabilidad de estos concretos para garantizar un comportamiento adecuado en las estructuras por construir. Se propone entonces este proyecto, que tiene como objetivo evaluar algunas de las propiedades eléctricas como resistividad, inductancia y capacitancia del concreto con cuatro porcentajes de agregado reciclado y dos valores de relación agua-cemento, buscando las correlaciones con algunas propiedades mecánicas y de durabilidad de este material. Los resultados obtenidos serán un referente para el uso de concretos con ACR en Colombia, con el objetivo de conocer su comportamiento, y al implementar su uso, aliviar la gran carga de escombros de los sitios destinados para tal fin, garantizando un desarrollo sostenible y encaminando el futuro del concreto, hacia la producción del llamado Green Concrete, diseñado para reducir el impacto medioambiental, comparado con el concreto tradicional.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

A continuación se muestran los materiales utilizados para la presente investigación (tabla 1).

Tabla 1
Propiedades de los agregados usados en la investigación

Propiedad	Gravilla Material natural de 3/4"	Arena	ACR
Peso unitario suelto	1036 kg/m ³	1568 kg/m ³	1135 kg/m ³
Peso unitario compactado	1494 kg/m ³	1742 kg/m ³	1295 kg/m ³
Densidad aparente	2338 g/cm ³	2593 g/cm ³	2107 g/cm ³
Densidad nominal	2600 g/cm ³	2700 g/cm ³	2635 g/cm ³
Absorción	4,3 %	1,5 %	9,5 %

El porcentaje de desgaste medido en la máquina de los ángeles para el ACR fue de 31,6 %. El cemento usado fue Cemex tipo estructural en bolsas de 42,5 kg. En la tabla siguiente se muestran las proporciones de ACR y relación agua/cemento usada en las ocho mezclas ensayadas (tabla 2).

Sobre las mezclas en cuestión, se realizaron ensayos de resistividad e impedancia (según la norma española UNE 83988-1), permeabilidad al ion cloruro (ASTM C1202-12: "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion

Penetration”), carbonatación y sortividad (ASTM C1585-11: “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes”), a edades de 28 y 90 días. Así mismo, ensayos de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad (según la norma NTC 673 y NTC 4025) y velocidad de pulso ultrasónico (según la norma NTC 4325) a edades de 3, 7, 28 y 90 días.

Tabla 2
Mezclas usadas en la investigación

Mezcla	% de agregado reciclado	Relación A/C
AN 1-0	0	0,50
ACR 2-25	25	0,50
ACR 3-50	50	0,50
ACR 4-100	100	0,50
AN 5-0	0	0,60
ACR 6-25	25	0,60
ACR 7-50	50	0,60
ACR 8-100	100	0,60

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Resistencia a la compresión

En la figura siguiente se muestran los resultados de resistencia a la compresión para las mezclas AN1-0 a la ACR4-100 con una relación agua/cemento de 0,5 y las mezclas AN5-0, a la ACR8-100 con una relación

agua/cemento de 0,6. Se puede apreciar en el gráfico que a medida que aumenta el porcentaje de ACR en la mezcla, se observa una merma en la resistencia a la compresión del concreto.

El porcentaje de disminución de la resistencia a la compresión a la edad de 28 días de las mezclas ACR2-25, ACR3-50 y ACR4-100 con respecto a la mezcla AN1-0 fue de 9,57, 12,35 y 32,16 %, respectivamente. Se obtuvo un comportamiento similar para las mezclas con relación agua/cemento de 0,6. Estos resultados son similares a los encontrados por Exteberria et al. (2007), quienes hicieron mezclas de concreto con porcentajes de 0, 25, 50 y 100 % de remplazo de agregado natural por ACR, encontrando que la resistencia a la compresión de mezclas con un 100 % de ACR tenían una reducción con respecto a la mezcla de control del 20 al 25 %. Las causas de esta reducción son la cantidad de ACR en las mezclas, la relación agua/cemento y el mortero adherido a los ACR que cumple un papel fundamental en la reducción de la resistencia a la compresión, ya que éste puede romperse en la zona de transición en la interfase agregado-pasta de cemento, por ser una zona débil en la estructura interna del concreto.

Módulo de elasticidad

A renglón seguido se muestra la variación del módulo elástico a las diferentes edades de ensayo para las mezclas en estudio (figura 2).

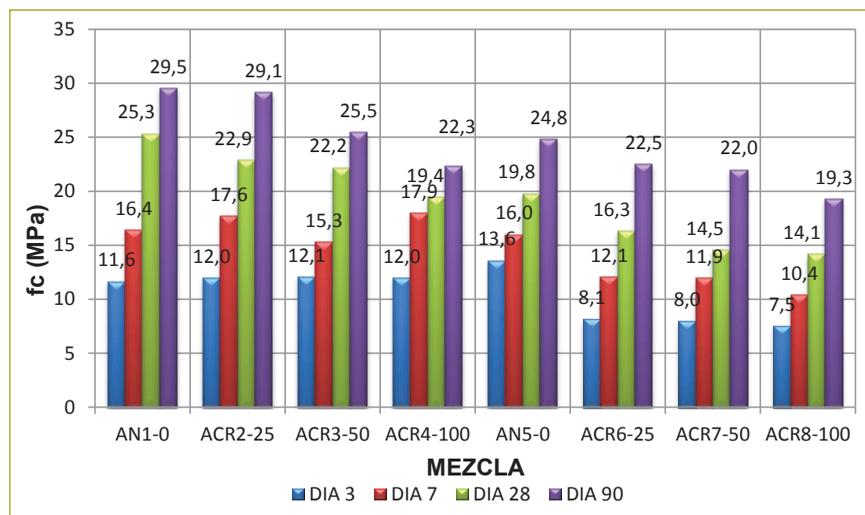


Figura 1. Gráfico comparativo de resultados de resistencia a la compresión para las mezclas en estudio.

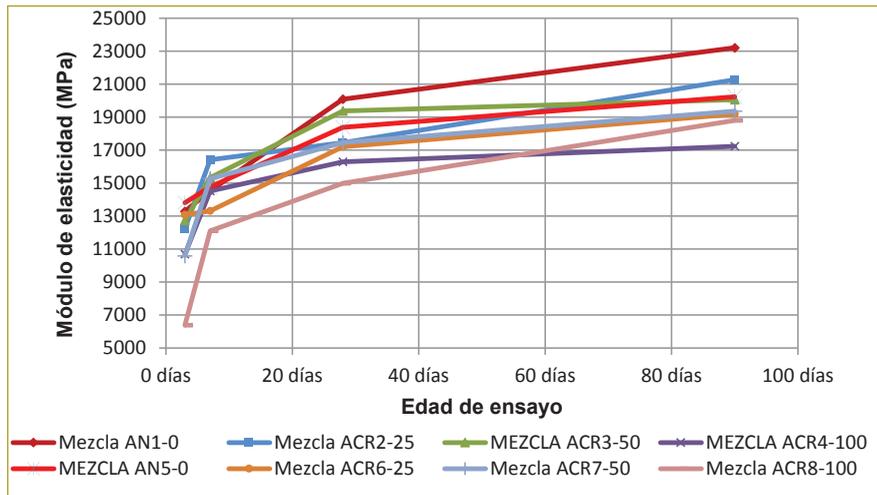


Figura 2. Influencia del contenido de ACR sobre el módulo elástico del concreto (A/C=0,5).

El porcentaje de reducción del módulo de elasticidad de las mezclas ACR2-25, ACR3-50 y ACR4-100 con respecto a la mezcla AN1-0 (mezcla patrón) a la edad de 28 días fue de 13,11, 3,56 y 18,92 %, respectivamente. Se obtuvo un comportamiento similar para las mezclas con relación agua/cemento de 0,6. Se aprecia que en la medida en que se aumenta el porcentaje de ACR en las mezclas, hay una reducción mayor en los valores de módulo de elasticidad.

Uno de los principales factores que influyen en la reducción del módulo de elasticidad del concreto con ACR es el módulo de elasticidad del agregado de

concreto reciclado, tal como indican McNeil & Kang, 2013, los cuales son más propensos a la deformación que los agregados naturales. Además, el ACR puede verse afectado por los impactos a los que es sometido durante el proceso de trituración del concreto (Yang, Chung & Ashour, 2008).

Velocidad de pulso ultrasónico

A renglón seguido se muestra un gráfico comparativo de la velocidad de pulso ultrasónico en las mezclas AN1-0 a la ACR4-100 y de la AN5-0 a la ACR8-100

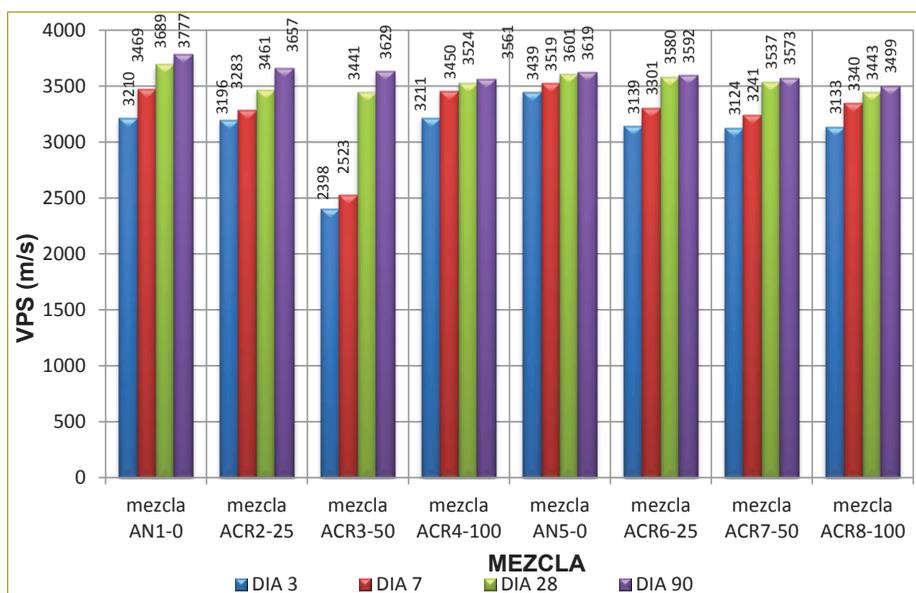


Figura 3. Gráfico comparativo de la velocidad de pulso ultrasónico para las mezclas en estudio.

(figura 3). Se observa un incremento de la velocidad de pulso ultrasónico a mayor edad en cada mezcla de concreto. De igual manera, se observa una tendencia a reducir el valor de esta medición en la mezclas con mayor contenido de agregado de concreto reciclado. Por último, la velocidad de pulso ultrasónico disminuyó en las mezclas con mayor relación agua-cemento. Los resultados son coincidentes con lo reportado por Al Khaleefi & Almutairi (2007), que hicieron ensayos de pulso ultrasónico sobre especímenes de tres mezclas con 0, 50 y 100 % de remplazo de agregado natural por ACR y una relación agua/cemento=0,53, obteniendo velocidades de pulso ultrasónico más altas para los concretos con menor porcentaje de ACR en la mezcla.

Permeabilidad al ion cloruro

Más adelante se puede apreciar un incremento significativo en la penetración al ion cloruro en la medida en que se aumenta el porcentaje de agregado de concreto reciclado en la mezcla para las mezclas AN1-0 a la ACR4-100. También se puede observar que a los 90 días de ensayo la penetración al ion cloruro disminuye con respecto a la medida a los 28 días. Estos resultados son coherentes con otras investigaciones realizadas (figura 4).

Para las mezclas AN5-0, ACR6-25, ACR7-50 y ACR8-100, se observa una tendencia contraria. Por tal razón, es necesario realizar ensayos adicionales para comprobar de manera acertada la tendencia en este ensayo. Entre los factores que pudieron afectar los resultados están los problemas durante la preparación de los

especímenes y su edad y curado, contenido de cemento y presencia de aditivos en el concreto con contenido de sales iónicas (Grace Construction Products, 2006). De acuerdo con lo establecido en la ASTM C1202-12, la mayoría de los concretos estudiados a 28 días tienen una alta penetración a los cloruros, mientras que a 90 días tienen una moderada penetración del ion cloruro.

Sortividad

A continuación se presenta un resumen del índice inicial de absorción para las mezclas AN1-0, ACR2-25, ACR3-50 y ACR4-100, para los especímenes ensayados a 28 días y 90 días (figura 5). Se observa en la edad de 28 días que en la medida en que se incrementa el contenido de ACR en la mezcla, aumenta la pendiente de la recta para la absorción inicial. Este incremento de pendientes en las rectas indica que los concretos con mayor contenido

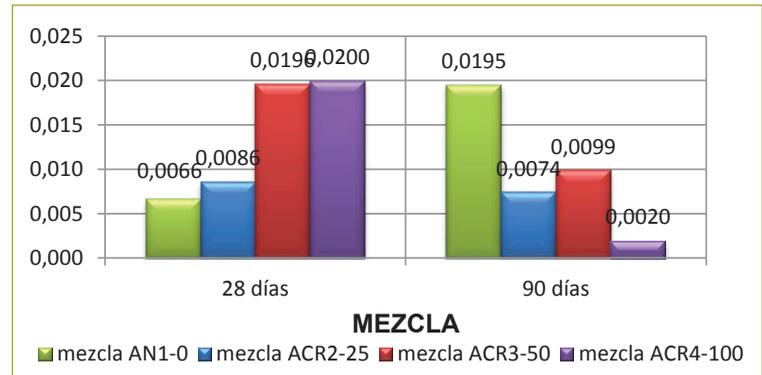


Figura 5. Índice inicial de absorción para las mezclas AN1-0, ACR2-25, ACR3-50 y ACR4-100 (A/C=0,5).

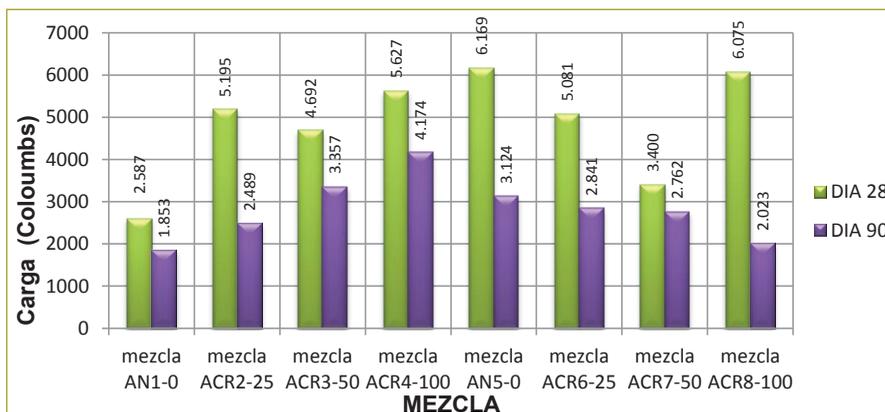


Figura 4. Gráfico comparativo en el ensayo de permeabilidad al ion cloruro para las mezclas en estudio.

Tabla 3
Profundidad de carbonatación inicial y final en mm

Mezcla	Profundidad de carbonatación inicial (P _i) (36 días en la cámara)				Profundidad de carbonatación final (P) (106 días en la cámara)			
	Mezcla AN1-0	Mezcla ACR2-25	Mezcla ACR3-50	Mezcla ACR4-100	Mezcla AN1-0	Mezcla ACR2-25	Mezcla ACR3-50	Mezcla ACR4-100
P (mm)	1,8	2,4	10,3	3,4	22,4	22,4	30,3	23,0
t (años)	0,098	0,098	0,098	0,098	0,29	0,29	0,29	0,29

de ACR tienen una mayor tasa de absorción. A 90 días se obtuvo una tendencia diferente, con un alto valor en la absorción inicial para la mezcla AN1-0 y una absorción muy baja para la mezcla ACR4-100, resultados que no coinciden con los esperados, ya que al aumentar el ACR en las mezclas de concreto, la porosidad de este material se incrementa notoriamente, lo que se debería reflejar en un mayor índice de absorción.

Carbonatación

En la tabla anterior se muestra la profundidad de carbonatación hallada durante un periodo de 104 días para las mezclas AN1-0, ACR2-25, ACR3-50 y ACR4-100 (tabla 3). Una vez establecido este avance de carbonatación se determina el coeficiente de carbonatación obtenido en la cámara (K_c), mediante la ecuación dada por la segunda ley de difusión de Fick ($x = k \sqrt{t}$).

Se esperaba en el ensayo una reducción en el frente de carbonatación, en la medida en que se aumentaba el contenido de ACR en las mezclas, según lo obtenido en los estudios de la Waste & Resources Action Programme (WRAP), en los que se encontró que la pro-

fundidad de carbonatación disminuye en la medida en que el contenido de ACR se incrementa en el concreto, probablemente por el aumento de la alcalinidad en el concreto debido al mortero adherido en los ACR. Sin embargo, con los datos obtenidos no se puede llegar a esta conclusión por las diferencias alcanzadas en los valores de profundidad de carbonatación.

Resistividad

Se puede observar una tendencia a la disminución del coeficiente de resistividad en el concreto cuando se aumenta el porcentaje de ACR en la mezcla, lo que indica que el acero que se embebe en este tipo de concretos tiene un riesgo más alto de corrosión (figura 6). Con un porcentaje de remplazo del 100 % del agregado en la mezcla por ACR, se aprecia que hay una reducción del orden del 27 % en los valores de resistividad con respecto a la mezcla patrón. Adicionalmente, se observa que a mayor edad en el concreto aumenta el valor de resistividad. Esto se atribuye al incremento de porosidad en los concretos con ACR, por la presencia de una zona de transición interfacial que facilita la conducción iónica. La mayor parte de los concretos en estudio se clasifican como de riesgo alto de corrosión del acero de refuerzo.

Impedancia

A continuación se presentan los diagramas de Nyquist, obtenidos para la espectrometría de impedancia realizadas a las diferentes muestras, a las edades de 28 días, en las que se observa un valor más alto de resistencia para la mezcla AN1-0 con respecto a las mezclas con ACR. De la misma manera, se observa que la mezcla con menor resistencia fue la ACR 4, lo que indica un cambio en la microestructura del concreto con ACR y mayor conductividad por la mayor porosidad presente.

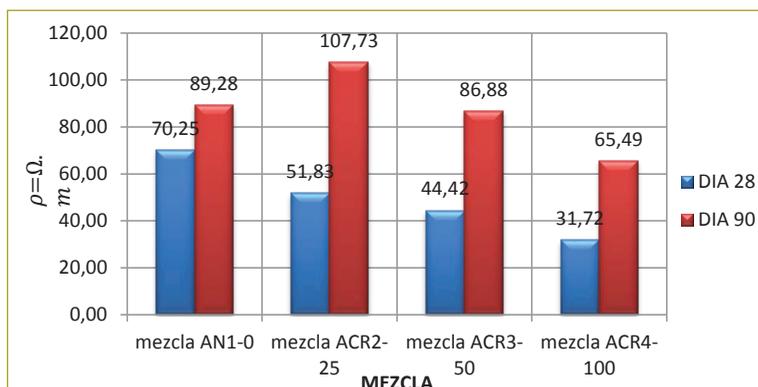


Figura 6. Gráfico comparativo de coeficientes de resistividad para las mezclas AN1-0, ACR2-25, ACR3-50 y ACR4-100. A/C=0,5.

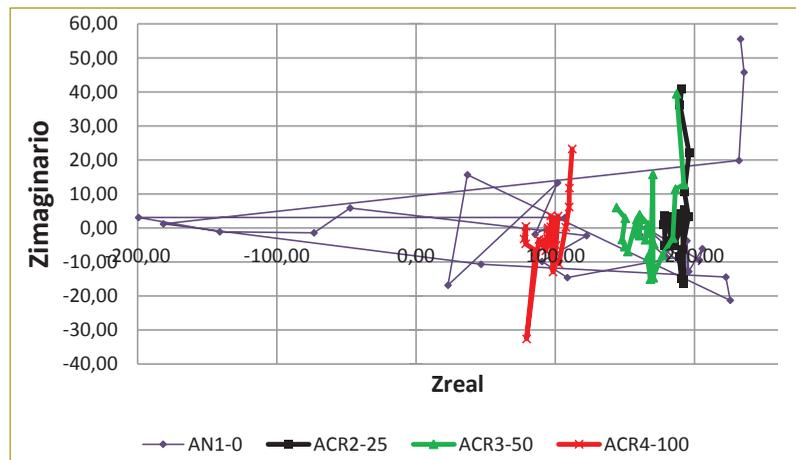


Figura 7. Gráfico de Nyquist para mezcla AN1-0. Edad 28 días.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- Las causas que inciden en la reducción de la resistencia a la compresión de concretos con ACR son las propiedades del ACR, su cantidad en la mezcla y la relación agua/cemento.
- El módulo de elasticidad del concreto disminuye en la medida en que se aumenta el porcentaje de ACR en las mezclas. La reducción del módulo de elasticidad para el tipo de ACR utilizado en este estudio fluctúa entre 18 y 25 %, cuando el porcentaje de remplazo de ACR en las mezclas es del 100 %.
- En la evaluación de algunas de las propiedades del concreto con ACR examinados, se pudo observar que a mayor porcentaje de remplazo del agregado natural por ACR, hay una afectación en el desempeño del concreto. Es así como se evidenció una tendencia a reducir la velocidad de pulso ultrasónico (mayor porosidad), un aumento significativo en la penetración al ion cloruro y una tendencia a disminuir el coeficiente de resistividad, lo que indica que el acero que se embebe en este tipo de concretos tiene un riesgo más alto de corrosión. Sin embargo, se hace énfasis en que para porcentajes de remplazo bajos de ACR en el concreto, la afectación de la durabilidad no es tan significativa.
- Se confirmó en el presente estudio lo encontrado en otras investigaciones respecto a que el valor de resistividad aumenta en la medida en que aumenta la edad en el concreto para concretos con ACR. De la misma manera, se pudo establecer para las mezclas AN1-0, ACR2-25, ACR3-50 y ACR4-100 que el valor de resistividad se reduce con el aumento en la proporción de ACR en la mezcla de concreto, lo que trae como consecuencia un mayor riesgo a la corrosión del acero de refuerzo en este tipo de concretos. Esto indica que la conductividad en concretos con mayor porcentaje de ACR es mayor a causa de la mayor porosidad del material debido a la zona de transición en la interfase agregado-pasta de cemento.
- Se confirmó en el presente estudio que la resistividad obtenida de los gráficos de Nyquist a diferentes frecuencias es menor para los concretos con ACR, en comparación con los concretos convencionales. Esto se debe al cambio en la microestructura del concreto y a las diferencias en la conductividad del material por la mayor porosidad presente.
- En el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico, la mayoría de los especímenes ensayados mostraron que las mezclas de concreto con ACR están clasificadas como ligeramente buenas a buenas. Adicionalmente, se observó que a mayor porcentaje de remplazo de ACR por agregado natural en los concretos ensayados, se presenta una reducción en la velocidad de pulso ultrasónico.
- Es recomendable hacer un análisis similar al realizado en el presente estudio a concretos con ACR proveniente de diversas fuentes conformadas por los centros de tratamiento o aprovechamiento, definidos en la Resolución 1115 del 26 de septiembre de 2012,

con el propósito de confirmar la factibilidad del uso de agregados reciclados en la industria del concreto, y analizar su efecto en las propiedades del concreto.

- Se recomienda efectuar investigaciones posteriores del comportamiento del concreto con ACR en miembros estructurales, así como evaluar los fenómenos de flujo plástico y retracción del concreto con estos agregados.
- Es recomendable hacer investigaciones posteriores, utilizando adiciones y puzolanas, como cenizas volantes, humo de sílice y metacaolín, para mejorar las propiedades de durabilidad de concretos con ACR.
- Es necesario realizar ensayos adicionales de permeabilidad al ion cloruro, sobre todo si se considera que los resultados obtenidos no fueron concordantes con otras investigaciones hechas.

REFERENCIAS

- Al Khaleefi, A. & Almutairi, N. (2007). Ultrasonic pulse testing, chloride content and sulphate content of recycled concrete as coarse aggregate. *Our World in Concrete & Structures*. Singapur.
- Arriaga, L. E. (2013). *Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado* (tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá.
- Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (noviembre de 2010). *Control de los residuos de construcción y demolición en los ayuntamientos*. España.
- Asocreto (2011). Agregados reciclados presentes en la rehabilitación de estructuras. *Asocreto*, 108, 62.
- ASTM C1202-12 (s.f.). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- ASTM C1585-11 (s.f.). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.
- Bojacá, N. R. (2013). *Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados* (tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá.
- Buozón Orgeira, N. (2011). *Evaluación del proceso de hidratación de morteros de cemento con ceniza volante mediante métodos destructivos y no destructivos* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Cassiano, J. (2010). *Valoración de propiedades eléctricas del concreto y su correlación con algunas propiedades mecánicas y de durabilidad* (tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá.
- Cement & Concrete Association from New Zeland (2011). *Best practice guide for the use of recycled aggregates in new concrete*. Nueva Zelanda.
- Coambiente S.A. (2009). Gestión Integral de escombros. Anteproyecto para la gestión integral de los RC&D en el Distrito Capital. Bogotá.
- Cortina Ramírez, J. M. (2007). *Guía para el manejo de residuos sólidos generados en la industria de la construcción*. Cholula, Puebla, México.
- Cruz, J.M., Landine, J., Lalinde, L.F. & Fita, I.C. (2010). *Evaluación de las propiedades eléctricas de morteros de cemento con puzolanas* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia España.
- Desai, S.B. & Limbachiya, M.C. (2006). Coarse recycled aggregate – a sustainable concrete solution. *The Indian Concrete Journal*, 17-23. ACC Limited Maharashtra.
- Exteberria, M., Vásquez, E. & Marí, A.R. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 735-742.
- Froudinston-Yannas, S. (1977). Waste concrete as aggregate for new concrete. *ACI Journal*.
- Fuertes, A. (2012). Hacia un desarrollo sostenible en la producción de concreto a partir de desechos de construcción de mampostería de arcilla. Bogotá.
- Grace Construction Products (2006). Technical Bulletin TB - 0100 Understanding AASHTO T277 y ASTM C1202 Rapid Chloride Permeability Test.
- Guzmán, D. S. (2002). *Durabilidad y patología del concreto*. Bogotá: Instituto del Concreto, Asocreto.
- Kang, T.-K., Kim, W., Kwak, Y.-K., & Hong, S.-G. (2012). The choice of recycled concrete aggregate for flexural members. *Proceedings of 18th International Association for Bridge and Structural Engineering Congress on Innovative Infrastructure*. Seúl.
- Limbachiya et al. (2000). Use of recycled aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 574-580.
- Lizarazo, J. (2008). Ensayos típicos en la determinación de la durabilidad del concreto. Seminario ACI. Ataque químico en el concreto.
- Maruyama, I. S. (2004). Flexural properties of reinforced recycled beams. *Proceedings of International Rilem Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, 525-535.
- Maruyama, I., Sogo, M., Sobage, T., Sato, R. & Kawai, K. (2004). Flexural properties of reinforced recycled beams. *Proceedings of International Rilem Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*.
- McNeil, K. & Thomas, H. & Kang, K. (2013). *Recycled Concrete Aggregates: A Review*. Estados Unidos.
- Natalani, M.B., Klees, D.R. & Tirner, J. (2000). Reciclaje y reutilización de materiales residuales de construcción y demolición. Argentina: Universidad Nacional del Nordeste Argentina.
- Norma española UNE 83988-1 (2008). Durabilidad del hormigón. Método de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica, parte 1: Método directo (método de referencia).
- NSR-10 (s.f.). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-resistente.
- Pinzón, H. (2009). Valoración de algunas propiedades del concreto adicionado con vidrio pulverizado. Bogotá.
- Corral Higuera, R., Arredondo-Rea, S.P., Neri Flores, M.A., Gómez-Soberón, J.M., Almaral Sánchez, J.L., Casterona González, J.H., Martínez Villafane, A., & Almeraya Calderón, F. (2011). *Chloride Ion Penetrability and Corrosion Behavior of Steel in Concrete with Sustainability Characteristics*.
- Rashwan, M.S. & Abourizh, S. (1997). The Properties of Recycled Concrete. *Concrete*. Estados Unidos.
- Rebolledo, N. R. (2010). *Aplicación de técnicas no destructivas al estudio del hormigón fresco* (tesis de maestría). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Shayan, A. & Xu, A. (2003). Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate. *ACI Materials Journal* 100(5), 371-380.
- Torres, N. (2009). Valoración del paso de cloruros en concretos con diferentes características. *Boletín técnico de la seccional*

Colombiana del Instituto Americano del Concreto ACI. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Torres, N. (2010). Concreto con agregados provenientes de escombros de construcción y demolición en Colombia. *Boletín Técnico de la Seccional Colombiana del Instituto Americano del Concreto ACI*.

Yang, K., Chung, H.-S. & Ashour, A. (2008). Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. *ACI Materials Journal*.

Zhang, M. I. (2009). *Recycled Concrete Aggregate and its Application in New Zealand Ready Mixed Production*. New Zealand Concrete Industries Conference.