



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y ELÁSTICAS DEL CONCRETO CON AGREGADO GRUESO RECICLADO MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

M.J. Chinchillas Chinchillas¹, C.A. Rosas Cásarez¹, J.L. Almaral Sánchez¹, J.M. Gómez Soberón², R. Corral Higuera¹, S.P. Arredondo Rea¹

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis. Fuente de Poseidón y Ángel Flores, Ciudad Universitaria, C.P. 81223. Los Mochis, Sinaloa, México.

² Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Avenida Gregorio Marañón 44-50, Z.C. 08028, Barcelona, España.

RESUMEN

Porque el concreto es el material de mayor demanda en el mundo, en la industria de la construcción, algunas estrategias importantes y contributivas al desarrollo sustentable son incrementar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, reducir el consumo de energía y materias primas así como reciclar y reutilizar materiales de desecho. El objetivo del trabajo fue evaluar la influencia que ejerce el uso de diferentes porcentajes de agregado grueso reciclado en la resistencia a compresión y comportamiento elástico del concreto. La resistencia fue evaluada en compresión y flexión mientras que el comportamiento elástico se determinó en función de constantes elásticas como el módulo de elasticidad, módulo de rigidez y relación de Poisson. Se utilizaron ensayos no destructivos como el índice de rebote y el ensayo de frecuencia de resonancia. Se concluye que el concreto fabricado con 25% de agregado reciclado mantiene un desempeño similar al del concreto convencional.

Palabras Clave: Concreto Reciclado, Ensayos no destructivos, modulo de elasticidad

ABSTRACT

Because concrete is the material of higher demand in the world, in the construction industry, some important and tax strategies to sustainable development are increasing the durability of concrete structures reinforced to reduce the consumption of energy and raw materials as well as recycling and reuse of waste materials. The objective of the study was to assess the influence exerted by the use of different percentages of coarse aggregate recycled in resistance to compression and elastic behavior of concrete. The resistance was assessed in compression and bending while the elastic behavior was determined based on elastic constants as the modulus of elasticity, rigidity module and Poisson ratio. As the index rebound nondestructive testing and testing of resonance frequency is used. It is concluded that the concrete manufactured with 25% of aggregate recycling maintains a performance similar to that of the conventional concrete.

Keywords: Concrete recycling, non-destructive testing, module of elasticity

INTRODUCCIÓN

En una mezcla de concreto, los agregados constituyen aproximadamente el 70% del volumen, por lo que, en todo el mundo grandes cantidades de roca triturada, grava y arena son extraídas, procesadas y transportadas, generando costos económicos y ambientales. El reciclaje del concreto producto de demolición y residuos de construcción ha sido tema de estudio desde los años 50, pero a partir del año 2000 se ha incrementado significativamente el número de investigaciones al respecto¹⁻¹⁰; sin embargo, la mayoría de las investigaciones se han concentrado en el estudio de propiedades físico-mecánicas de los agregados de concreto reciclado y del concreto hecho con ellos y poco se ha investigado en cuanto al desempeño estructural y la durabilidad del concreto con agregado reciclado (CAR) con el propósito de usarlo en elementos con altas solicitaciones estructurales y expuesto a condiciones ambientales severas.

El uso de agregados reciclados en el concreto abre un nuevo abanico de posibilidades en la reutilización de materiales en la industria de la construcción. Esto podría ser un avance importante para nuestra sociedad en nuestros esfuerzos hacia el desarrollo sustentable. Reciclar el concreto es una forma muy efectiva para eliminar escombros procedentes de demoliciones de edificios, pavimentos, puentes y otras construcciones hechas con concreto. Reciclar estos escombros de concreto es mejor solución que llevarlos a vertederos, además de que en ciertas regiones se pueden abatir costos, representando una solución más ecológica y económica y se reduciría la explotación de grava procedente de la minería o de los ríos. En áreas donde existe una baja disponibilidad de agregados, o el abastecimiento del mismo es costoso por los altos costos de la tierra, o existe una regulación ambiental adversa, reciclar es la única solución económicamente viable.

Actualmente uno de los problemas más importantes que se observa en las estructuras de concreto reforzado, son los daños causados por sobrecargas, y cargas dinámicas. Estas acciones, muchas veces no previstas, ponen en riesgo la integridad estructural de las estructuras de concreto. El comportamiento estructural de las estructuras de concreto ante acciones dinámicas está en función del comportamiento elástico de los materiales usados, es decir, de su módulo de elasticidad, su módulo de rigidez y la relación entre ambos (relación de Poisson).

Ante el par de situaciones descritas, se vuelve necesario construir estructuras de concreto reforzado que sean durables y a la vez compatibles con el medio ambiente. En ese sentido, y tomando en cuenta que el módulo de elasticidad, el módulo de Poisson y el módulo de rigidez son las principales constantes elásticas tomadas en cuenta en la ingeniería estructural, se planteó este trabajo con el objetivo de evaluar tales constantes y la resistencia a compresión y flexión del concreto fabricado con diferente porcentaje de agregado grueso reciclado.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales y mezclas

El cemento utilizado fue Cemento Portland Compuesto de resistencia 30 (CPC 30R), los requerimientos físico-químicos se estipulan en la norma NMX-C-414 y equivale al cemento Portland ordinario Tipo III que establece ASTM C150. El agregado grueso natural utilizado tiene una masa específica relativa de 2.5, una masa volumétrica seca de 1614.58 kg/m³ y un tamaño máximo nominal de 25 mm. Con las pruebas realizadas en el laboratorio resultó una absorción de

0.52% y una humedad de 0.28%. El agregado fino tiene una masa específica relativa de 2.43, una masa volumétrica seca de 1609.09 kg/m³ y modulo de finura de 3. Con las pruebas realizadas en el laboratorio resultó una absorción de 4.08% y una humedad de 6.15%. Los agregados naturales se obtuvieron de la planta Cemex Concretos. El agregado grueso de concreto reciclado (AR) procedió de la trituración de probetas de laboratorio con resistencia a compresión de 20 MPa; su densidad relativa fue de 2.1, su absorción de 6.25%, su masa volumétrica de 1383 kg/m³ y humedad de 1.26%. Las mezclas fueron hechas con una relación agua/cemento de 0.5 y los porcentajes de AR utilizado fueron 0% (referencia), 25%, 50%, 75% y 100%.

La distribución granulométrica de los agregados utilizados se muestra en la Figura 2, donde se puede observar que el agregado grueso se sale de los límites ASTM en los tamaños mayores. Esta distribución es la que utiliza la planta concretera para tener un mayor volumen de agregado y disminuir el consumo de cemento sin sacrificar el desempeño del concreto.

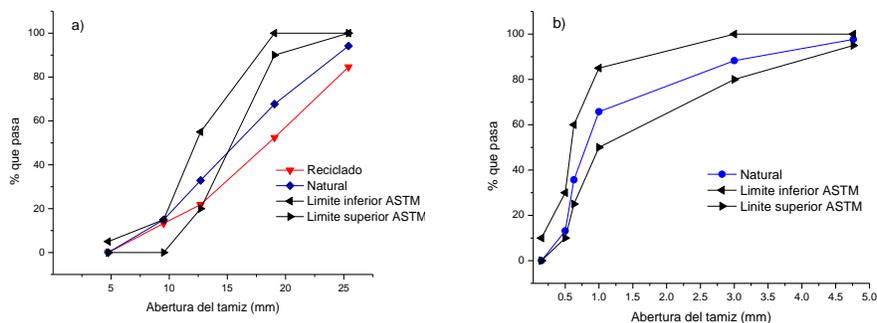


Figura 1. Distribución granulométrica de los agregados: a) Grueso, b) Fino

Resistencia a compresión, resistencia a flexión y curvas carga-desplazamiento mediante ensayos destructivos

La evaluación de la resistencia a compresión y flexión de cada serie de concreto propuesto se llevó a cabo en probetas cilíndricas ($h=30$ cm, $\Phi=15$ cm) y prismáticas rectangulares ($a=15$ cm, $b=15$ cm, $L=50$ cm), respectivamente. De acuerdo a la norma ASTM C39, las probetas cilíndricas de cada mezcla fueron sometidas al ensayo de compresión a los 28 días de curado en una prensa universal que registró lecturas de desplazamiento de manera simultánea a la aplicación de la carga. Los ensayos de flexión se condujeron conforme ASTM C78 en el mismo equipo. La configuración de los ensayos se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

a)



b)



Figura 2. Configuración del ensayo de resistencia: a) compresión, b) flexión

Evaluación del comportamiento mecánico y elástico mediante ensayos no destructivos. “Índice de rebote y estimación de resistencia a compresión”.

Para evaluar el índice de rebote y estimar se colocó el esclerómetro en forma perpendicular sobre la superficie del concreto de las vigas y se ejerció una pequeña presión para permitir que el embolo se libere y se dejó que se extendiera hasta alcanzar su máxima extensión, eliminando la presión sobre el martillo, cuidando siempre que se conservara la perpendicularidad y que la presión fuera uniforme hasta que la masa interna del martillo golpeó la superficie del concreto. Después del impacto se oprimió el botón pulsador y se tomó la lectura en la ventana de la escala graduada, registrando el índice de rebote. En la Figura 3 se muestra el esclerómetro y la configuración del ensayo.

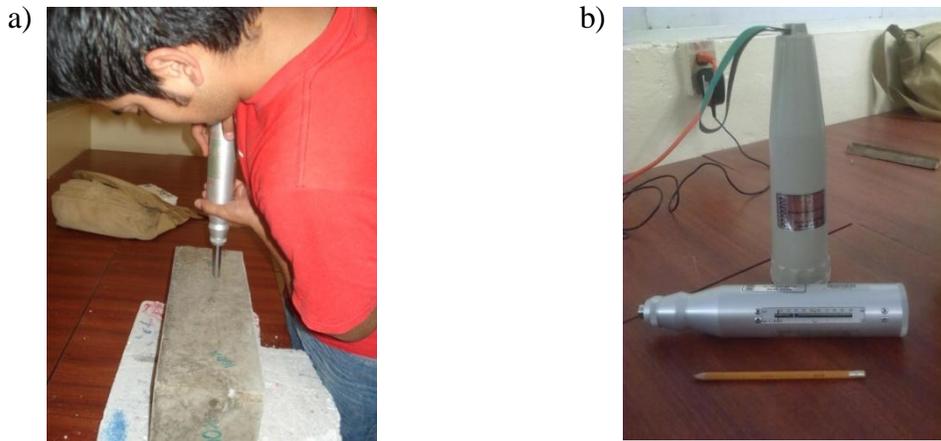


Figura 3. a) Configuración del ensayo para determinar el índice de rebote, b) Esclerómetro

Frecuencia de Resonancia y estimación del módulo de elasticidad dinámico, módulo de rigidez dinámico y relación de Poisson.

La determinación del módulo de elasticidad dinámico, módulo de rigidez y la relación de Poisson de las mezclas en estudio se llevó a cabo por la técnica no destructiva de resonancia acústica por impacto según ASTM C215. Este ensayo se llevó a cabo sobre las vigas y el esquema general se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Configuración para determinar frecuencia de resonancia en el modo torsional.

RESULTADOS

Resistencia a compresión y flexión

En la Figura 5 se muestra la variación de la resistencia a compresión y flexión de las mezclas ensayadas en función del porcentaje de utilización de AR.

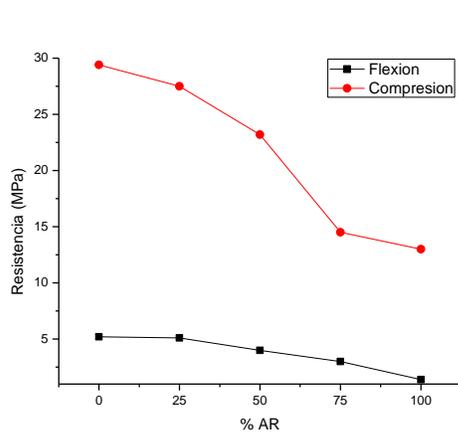


Figura 5. Variación de la resistencia en función de la cantidad de AR

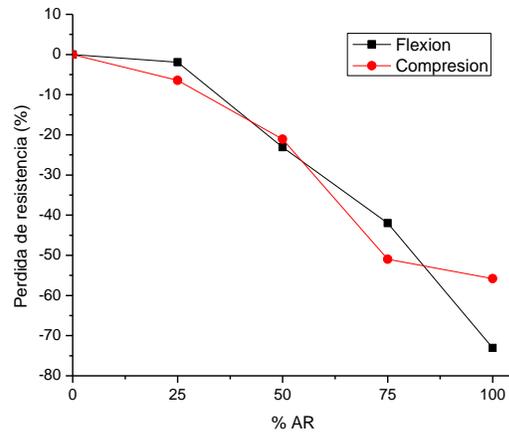


Figura 6. Pérdida de resistencia con respecto al concreto de referencia

Puede observarse que utilizando hasta un 25% de AR, la resistencia a compresión y flexión no varía significativamente con respecto a la mezcla de referencia; mientras que al utilizar AR en porcentajes de 75 y 100 resultó en una disminución drástica de ambas resistencias. A partir de los resultados de resistencia, se determinó la variación en % de cada una de las mezclas con respecto a la mezcla control. Los resultados se muestran en la Figura 6 donde puede observarse que el % de variación al utilizar 25% de AR no es significativo con -6% y -2% para la resistencia a compresión y flexión, respectivamente. También se observa que el utilizar 50% de AR resulta en variaciones del -21% en compresión y -23% en flexión, para el 75% de AR las variaciones fueron del -51% y -42% para las resistencias a compresión y flexión, en ese orden, mientras que para el 100% de AR la variación es del -56% y -73% para compresión y flexión, respectivamente.

En las curvas carga-desplazamiento que se muestran en la Figura 7 se puede observar que el uso de hasta un 25% de AR no produce deformaciones significativas con respecto al concreto de referencia. De igual manera la carga máxima de ambos sistemas es muy similar y cercana a los 25000 kgf. Los concretos con 75% y 100% AR mostraron deformaciones similares entre sí y mayores que los sistemas de referencia y con 25% de AR, además de que la carga máxima que registraron osciló alrededor de los 10000 kgf. El concreto con 50% de AR mostró una deformación ligeramente superior que el sistema de referencia y una carga máxima que apenas superó los 15000 kgf, lo cual puede significar que su módulo de elasticidad no es muy diferente al del concreto de referencia.

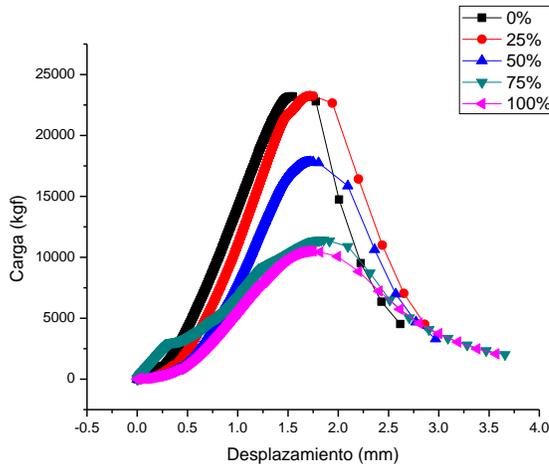


Figura 7. Curvas carga-desplazamiento

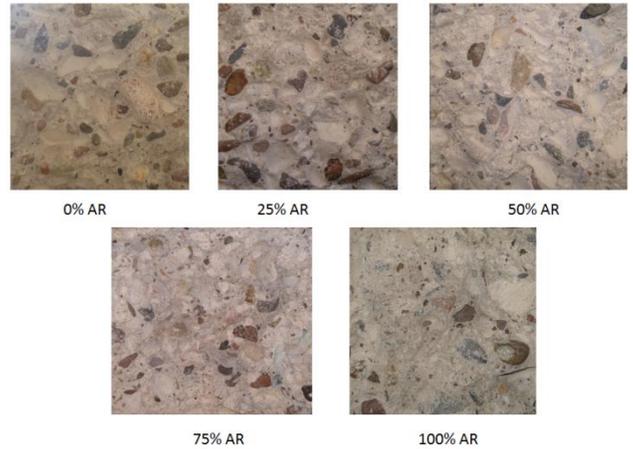


Figura 8. Sitio de falla ante la aplicación de carga a flexión

Con este comportamiento, es presumible que el módulo de elasticidad del concreto de referencia y del concreto con 25% de AR sea muy similar, es decir, sin variaciones significativas. El efecto considerable del AR en el comportamiento elástico del concreto se presenta a partir de la utilización del 50% de AR y la mayor deformación y menor carga máxima para reemplazos superiores al 25% es atribuido a que aparecen nuevos sitios de falla a través del mortero adherido del agregado reciclado como lo revela la Figura 8.

Puede observarse en la Figura 8 que en los concretos con 0% y 25% de AR hay gran cantidad de oquedades con la forma de los agregados y agregados naturales expuestos, lo que confirma que los sitios preferenciales de falla en estos concretos es en la interface entre el agregado y el mortero nuevo o Zona de Transición Interfacial (ZTI). La disminución de oquedades y agregados naturales visibles a medida que se incrementa la cantidad de AR confirman que en el concreto con cantidades de AR igual o mayor al 50% presenta sitios de falla a través del mortero adherido del agregado reciclado (ZTI antiguas) y en menor medida sitios de falla a través de la interface agregado (natural o reciclado)-mortero nuevo (ZTI nuevas). Con lo anterior, es presumible que la utilización de AR en cantidades igual o superiores al 50% incrementa las ZTI en el concreto y por ende la disminución de las propiedades.

Módulo de elasticidad y módulo torsional dinámicos y relación de Poisson.

En la Figura 9 se muestra el módulo de elasticidad dinámico (E_d) de cada serie de concreto en función del tiempo de curado.

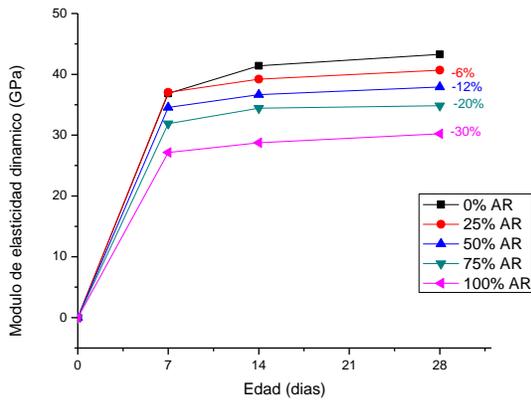


Figura 1. Módulo de elasticidad dinámico obtenido en modo longitudinal

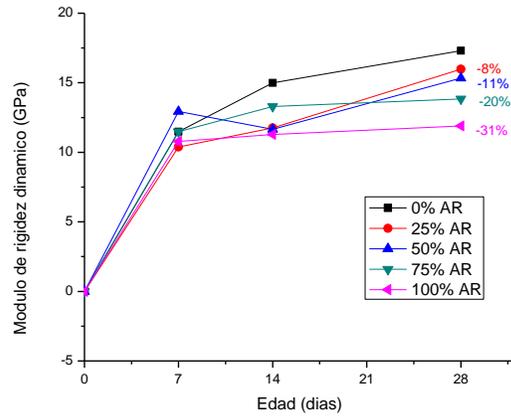


Figura 10. Módulo de rigidez dinámico

Se puede observar en la figura 9 que E_d a los 28 días no varía significativamente (-6%) al utilizar 25% de AR, incluso utilizando hasta 50% de AR el decremento en E_d es sólo del 12%, lo cual hace pensar que utilizar AR entre el 25% y 50% no representaría riesgos desde el punto de vista estructural. Los decrementos mayores de E_d se observan en las mezclas con 75% AR (-20%) y con 100% AR (-30%). En cuanto al módulo de rigidez dinámico (G_d), en los resultados mostrados en la Figura 10 se puede observar que es a partir de los 14 días cuando realmente aparece una tendencia clara, sobre todo en las mezclas con 25% y 50% de AR. La irregularidad de los resultados en los primeros 14 días de estas dos mezclas puede atribuirse a errores en las mediciones de las frecuencias de resonancia debido a que los resultados obtenidos a los 28 días marcan la tendencia lógica y esperada. Se puede observar en la Figura 10 que G_d a los 28 días no varía significativamente (-8%) al utilizar 25% de AR, incluso utilizando hasta 50% de AR el decremento en G_d es sólo del 11%, lo cual supondría que se pudiera utilizar hasta 50% de AR sin mayor riesgo estructural. Los decrementos mayores de G_d se aprecian en las mezclas con 75% AR (-20%) y con 100% AR (-31%).

La relación entre E_d y G_d o relación de Poisson (μ) en función de la cantidad de AR y la edad de curado se muestra en la Figura 11 donde puede observarse que en los primeros 14 días μ es variable entre 0.2 y 0.8, comportamiento atribuido a los errores de medición de las frecuencias de resonancia para determinar G_d . Sin embargo, puede notarse que a los 28 días de curado, los valores de μ se estabilizaron en un rango de 0.2 y 0.3, valores característicos del concreto.

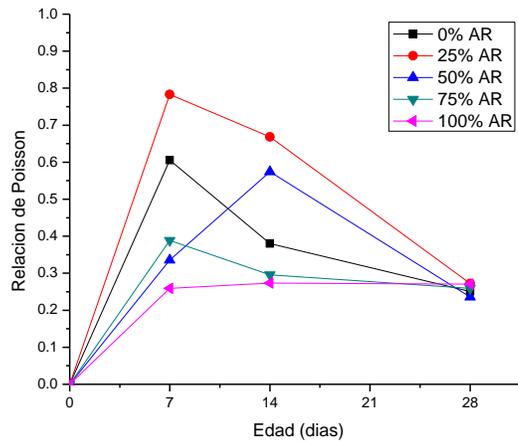


Figura 11. Relación de Poisson

Índice de rebote

En la Figura 12 se muestran los resultados del ensayo de Índice de Rebote (IR) donde puede observarse que el IR para los concretos con 0% y 25% de AR es muy similar durante los 28 días de curado y tendrían una resistencia a compresión similar, lo cual es corroborado con los resultados obtenidos mediante el ensayo destructivo a compresión. Las mezclas con 50% y 75% de AR presentan IR semejantes lo cual es contradictorio a la considerable diferencia en su resistencia a compresión. Tal discrepancia entre IR y resistencia a compresión puede deberse a diferencia en los acabados de las probetas, por ser la técnica de IR un indicador de la dureza de la superficie y no del volumen de concreto.

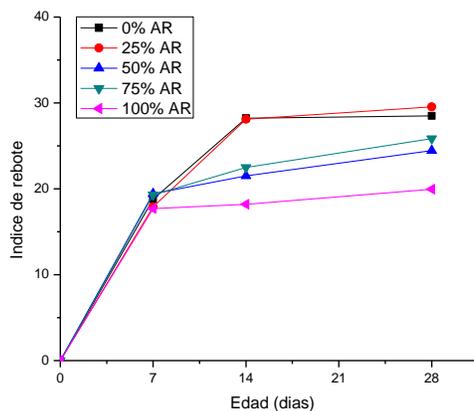


Figura 12. Índice de rebote en función de la cantidad de AR

La utilización de 50% y 75% de AR se traduce en una disminución del IR de alrededor del 14%, mientras que el utilizar el 100% de AR representa un decremento del IR del 30%

CONCLUSIONES

Con respecto al concreto de referencia, el % de variación al utilizar 25% de AR no fue significativo con -6% y -2% para la resistencia a compresión y flexión, respectivamente. La variación al utilizar 50% de AR fue de -21% en compresión y -23% en flexión, mientras que para el 100% de AR la variación fue del -56% y -73% para compresión y flexión, respectivamente.

El uso de hasta un 25% de AR no produce deformaciones significativas con respecto al concreto de referencia, presentando una curva carga-desplazamiento similar y decremento en el módulo de elasticidad dinámico de sólo el 6% y de 8% en el módulo de rigidez dinámico.

Los concretos con 75% y 100% AR mostraron deformaciones similares entre sí y considerablemente superiores que los sistemas de referencia y con 25% de AR; los módulos de elasticidad y de rigidez dinámicos del concreto con 75% de AR fue 20% menor que el concreto de referencia; para el concreto con 100% de AR los módulos de elasticidad y de rigidez dinámicos fueron 30% menor que los del concreto de referencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud a la Universidad Autónoma de Sinaloa por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación a través de su infraestructura.

REFERENCIAS

1. A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC", *Cement and Concrete Composites*, 24, 2 (2002): pp. 269-279.
2. H. Chen, T. Yen, and K. Chen, "Use of building rubbles as recycled aggregates", *Cement and Concrete Research*, 33,1 (2003): pp. 125-132.
3. A. Katz, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", *Cement and Concrete Research*, 33, 5(2003): pp. 703-711.
4. C. Poon, "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete", *Cement and Concrete Research*, 34, 1(2004): pp. 31-36.
5. I. Topçu, S. Sengel, "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate", *Cement and Concrete Research*, 34, 8(2004). pp. 1307-1312.
6. H. Chen, T. Yen, and K. Chen, "Use of building rubbles as recycled aggregates", *Cement and Concrete Research*, 33,1 (2003): pp. 125-132.
7. I. Martínez-Soto, C. Mendoza-Escobedo, "Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados", *INGENIERÍA Investigación y Tecnología*, 7,3(2006): pp. 151-164.
8. K. Rahal, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate", *Building and Environment*, 42, 1(2007): pp. 407-415.
9. M. Casuccio, G. Giaccio, R. Zerbino, "Failure mechanism of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 22(2008): pp. 1500-1506.
10. A. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews, "Construction and Buildings Materials, 23, (2009): pp 829.