

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ÁRIDOS RECICLADOS TIPO HORMIGÓN

Antonio José Tenza-Abril¹, Debora Acosta Alvarez², Anadelys Alonso Aenlle³

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Campus de San Vicente del Raspeig, Carr. de San Vicente del Raspeig, s/n, CP 03690, España;
e-mail: ajt.abril@ua.es

² Docente, Asistente, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical, CECAT, Calle 114 #11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Mariano - CP 19390.
e-mail: dacostaa@civil.cujae.edu.cu

³ Docente, Auxiliar, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical, CECAT, Calle 114 #11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Mariano - CP 19390.
e-mail: anadelys@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Los residuos sólidos han sido un inevitable producto de las operaciones del crecimiento económico, industrial y de la sociedad; los cuales con un debido procesamiento pueden ayudar a minimizar la explotación de recursos naturales. Los áridos reciclados tipo hormigón (ARH) procedentes de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) difieren esencialmente de los áridos naturales debido a la capa de mortero adherida a su superficie. Con el fin de utilizar los ARH en las mezclas asfálticas en caliente se investigan en el presente trabajo las características de los áridos reciclados tipo hormigón, provenientes de la demolición de una losa de cubierta de hormigón armado. Se diseñaron tres mezclas asfálticas en caliente (MAC) semidensas con tamaño máximo 25mm (SD-25), una con 0% de ARH y las dos restantes sustituyendo de la fracción 5-10mm el 40% y 60% del árido natural (AN) por ARH. Se ensayaron sus propiedades mecánicas evaluando su estabilidad y deformación, además de sus parámetros volumétricos para definir la influencia del ARH y se analizó la resistencia al agua de las mismas. Se obtuvo como resultado más favorable la mezcla asfáltica donde se sustituyó el 60% de ARH.

Palabras claves: áridos reciclados tipo hormigón (ARH), mezclas asfálticas en caliente, residuos de construcción y demolición (RCD), resistencia.

“STUDY OF THE PROPERTIES OF HOT ASPHALT MIXTURES WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATES”

ABSTRACT

Solid waste has been an inevitable product of the operations of economic, industrial and societal growth; they can help to minimize the exploitation of natural resources if they are processed. Recycled concrete aggregates (RCA) from Construction and Demolition Waste (CDW) differ essentially from natural aggregates (NA) due to the mortar attached to its surface. In order to use RCA in hot asphalt mixtures, the properties of RCA from a demolition of a reinforced concrete deck slab were analysed in this research. Three semi-dense hot asphalt mixture were designed with an aggregate maximum size of 25mm (SD-25), one mixture with 0% RCA and the two remaining, substituting 40% and 60% of the NA from the 5-10mm fraction by RCA. Their mechanical properties were tested evaluating their stability and deformation. In addition, to their volumetric parameters to define the influence of RCA, and their water resistance were also analysed. The better results were obtained in the asphalt mixture where 60% of NA was replaced by RCA.

Keywords: recycled concrete aggregates (RCA), hot asphalt mixes, construction and demolition waste (CDW)

Nota Editorial: Recibido: febrero 2020; Aceptado: mayo 2020

1. INTRODUCCIÓN

La acumulación de residuos de construcción y demolición (RCD) constituye hoy un problema que afecta a la sociedad y al medio ambiente; por lo cual se ve la necesidad de eliminar dichos vertederos, reutilizar estos desechos y convertirlos así en materia prima para la construcción [1]. El reciclaje de los RCD mediante su transformación en áridos reduce la demanda de extracción de materias primas naturales. Las consideraciones con el desarrollo sostenible son básicas para estas cuestiones a fin de garantizar recursos suficientes destinados a las generaciones futuras [2]. Para tal efecto, se ha encontrado en la realización de mezclas asfálticas una manera de aprovechar los RCD para incorporarlos como áridos [3-14]. Así se solucionan tres situaciones importantes: la enorme cantidad de residuos producidos, la inadecuada disposición final que se les da y la afectación de montañas y otros entornos naturales arrasados [4].

Los áridos reciclados tipo hormigón (ARH) se caracterizan por la presencia de mortero adherido en su superficie que hace que posean propiedades distintas a los áridos naturales, reflejando un aumento de la absorción de agua, disminución en la densidad, la resistencia, la dureza y en la resistencia a la fragmentación [2, 15-21]. Los ARH son más porosos que los naturales y en las mezclas asfálticas absorben grandes cantidades de asfalto hacia el interior de los granos, reduciendo los espesores de película que envuelven el árido; debido a ello, con la incorporación de estos a las mezclas asfálticas, el volumen de huecos de áridos aumenta, mientras que el de huecos rellenos de asfalto y en mezclas tienden a decrecer [12, 14-16, 22]. Por estas razones a medida que se incrementa la proporción ARH en las mezclas asfálticas el contenido óptimo de asfalto de las mismas tiende a aumentar [12, 14, 16, 22, 23], así como la deformación [24] y la susceptibilidad al agua [25]; mientras la estabilidad puede disminuir [24]. Aunque existen algunos autores que no coinciden con estos resultados [26, 27], aun así se cumplen las especificaciones.

Por lo anterior, el desarrollo de esta investigación se basa en el análisis de la influencia de los ARH en las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente con sustitución del 40% y el 60% en la fracción gruesa (5-10mm). Para ello se realizan ensayos de densidad y huecos, estabilidad, deformación Marshall y resistencia al agua, que permiten determinar si estas se comportan como una mezcla convencional. Además se analizan propiedades físicas y microscópicas del árido reciclado utilizado.

2 DESARROLLO

2.1 Materiales a emplear

Se emplearon tres fracciones para la combinación del agregado natural (0-5mm, 5-10mm, 10-25mm) procedente de la Cantera Alacranes, una fracción de árido reciclado (5-10mm) obtenido de la demolición de una losa de cubierta de hormigón armado y se utilizó un ligante asfáltico 50/70.

2.1.1 Características del ligante asfáltico

En la tabla 1 se ven reflejados los resultados de la caracterización del ligante asfáltico.

Tabla 1: *Parámetros de control de calidad del ligante asfáltico*

Ensayos realizados	Resultados	Normas de Referencia	Índices de calidad	Observaciones
Penetración (1/10mm)	55,3	NC 401:2005	50 – 70	Cumple
Punto de ablandamiento (°C)	51,5	NC 516:2007	51 - 58	Cumple
Punto de inflamación (°C)	> 289	NC 438:2006	230 Mín.	Cumple
Punto de combustión (°C)	> 350	NC 438:2006	300 Mín.	Cumple
Peso específico (g/cm ³)	1,015	NC 437:2006	> 1,000	Cumple
Ductilidad (cm)	111	NC 515:2007	> 100	Cumple

Los parámetros medidos cumplen con las especificaciones de las normas cubanas, por tanto, el ligante asfáltico puede ser utilizado para el diseño de las mezclas.

2.1.2 Características del árido natural

Se emplearon tres fracciones de áridos naturales: 0-5mm, 5-10mm y 10-25mm provenientes de la cantera Alacranes, las cuales se puede observar en la Figura 1.



Figura 1: Áridos naturales utilizados en la fabricación de las distintas mezclas.

En la Figura 2 se pueden apreciar las granulometrías de los áridos naturales.

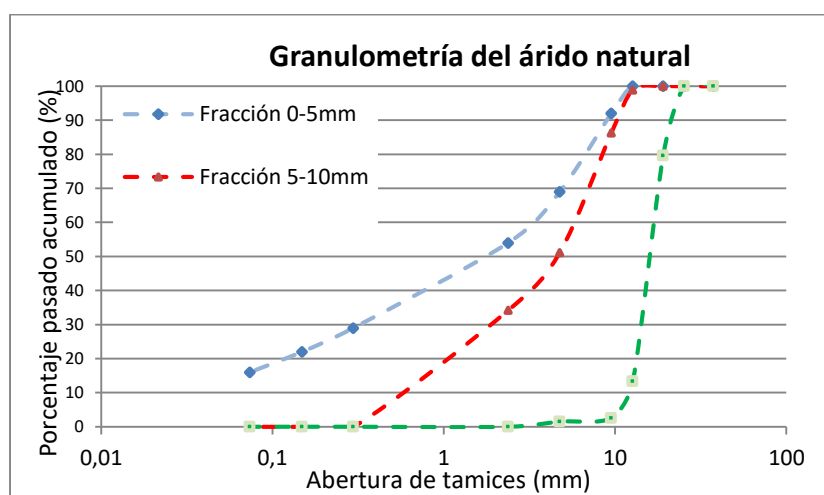


Figura 2: Granulometría de los áridos naturales.

En la Tabla 2 se puede apreciar la caracterización de los áridos naturales.

Tabla 2: Caracterización de los áridos naturales utilizados

Ensayos	Resultados			Especificación de calidad para cada capa	
	10-25mm	5-10mm	0-5mm	Rodadura	Intermedia
Peso E. C. (g/cm ³)	2,550	2,570	2,737	≥ 2,5	≥ 2,5
Peso E. S. (g/cm ³)	2,589	2,590	2,763		
Peso E. A. (g/cm ³)	2,654	2,630	2,810		
Absorción (%)	1,537	1,020	0,940	0,8 - 2,0	0,8 - 2,5
Equivalente de arena (%)	-	-	69	≥55	≥50
Tamiz #200 (%)	1,29	10,65	13,87	≤ 4	≤ 4

A partir de los resultados de la Tabla 2 y de la Figura 2 se puede concluir que los áridos naturales cumplen con las especificaciones propuestas en la NC 253: 2005 exceptuando las especificaciones para tamiz 200 en las fracciones 5-10mm y 0-5mm [28].

2.1.3 Características del árido reciclado en la fracción 5-10mm

El árido reciclado utilizado es producto de la demolición de una losa de cubierta de hormigón armado. En una primera instancia el residuo obtenido de la demolición se reduce a tamaño máximo de 30cm con chipijama extrayéndole manualmente los restos de acero y luego se trituran en una trituradora de mandíbulas, el material obtenido es tamizado en la fracción 5-10mm. En la Figura 3 se pueden observar los residuos de la demolición de la losa de hormigón.



Figura 3: Residuos de la demolición de una cubierta de hormigón armado

Para la caracterización de los áridos reciclados se realizaron los mismos ensayos establecidos en las normas cubanas para áridos naturales; los que permitieron conocer la calidad que presentan (ver Tabla 3 y Figura 4). Además, se realizaron ensayos microestructurales para determinar componentes químicos y fases mineralógicas del residuo utilizado (ver Tabla 4 y Figura 5).

La granulometría del ARH se muestra a continuación.

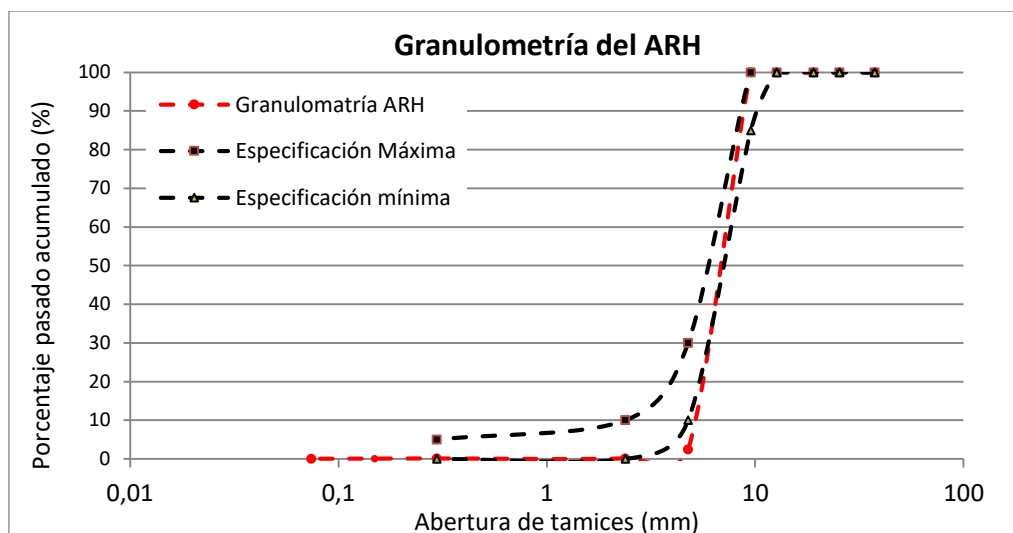


Figura 4: Granulometría del ARH

Los resultados de la caracterización del material reciclado se muestran a continuación:

Tabla 3: Caracterización del árido reciclado

Ensayos	Resultados	Especificación de calidad para cada capa	
		Rodadura	Intermedia
Peso E.C. (g/cm ³)	2,21	≥ 2,5	≥ 2,5
Peso E. S. (g/cm ³)	2,35		
Peso E. A. (g/cm ³)	2,57		
Absorción (%)	6,29	0,8 - 2,0	0,8 - 2,5

Según los resultados obtenidos en la Tabla 3 y Figura 4 el ARH no cumple con las especificaciones granulométricas, los pesos específicos están por debajo de los valores normados; así como la elevada absorción, esto debido al mortero adherido, lo cual es constatado con resultados de investigaciones anteriores [10, 19, 21, 29-33]. A pesar de estos resultados, se decide utilizar el ARH procedente de la losa de cubierta de hormigón armado para la confección de las mezclas asfálticas para observar la influencia de estos en las mismas.

A continuación, en la Figura 5 se muestra el resultado de la difracción de Rayos X, en la cual se pueden observar las principales fases mineralógicas del residuo.

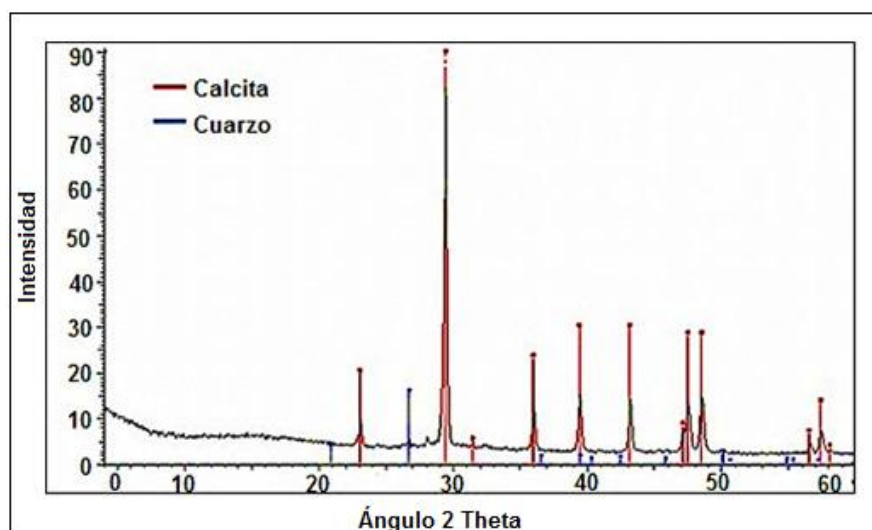


Figura 5: Difracción de Rayos X del RCD

En la Figura 5 se aprecia que el principal componente del residuo es la calcita: mineral formado por carbonato cálcico (CaCO_3), compuesto primario de los hormigones y de los áridos naturales de origen calizo. Otro mineral presente es el cuarzo que está compuesto por sílice (SiO_2), este es el mineral más común de la corteza terrestre y está presente en una gran cantidad de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Por tanto, se puede concluir que el RCD está compuesto fundamentalmente por áridos naturales de origen calizo.

Tabla 4: Composición química del RCD en óxidos.

	Composición química (%)
Na_2O	0,21
MgO	1,82
Al_2O_3	2,46
SiO_2	10,40
P_2O_5	0,08
SO_3	0,82
K_2O	0,17
CaO	43,51
TiO_2	0,21
Fe_2O_3	1,71
SrO	0,06
WO_3	0,15

En la Tabla 4 se observan los resultados obtenidos en la fluorescencia de rayos X (en óxidos) donde se muestra que el principal componente del RCD es el CaO (Óxido de Carbono) con un 43,51%; en segunda posición según su cantidad se encuentra el SiO_2 (Sílice) con un 10,40%; por último, el Al_2O_3 (Alumina) con un 2,46%; el resto de los componentes se encuentran en proporciones inferiores al 2%.

Basados en los resultados presentados en la Figura 5 y en la Tabla 4 se demuestra que el residuo analizado tiene una composición química homogénea y que no presentan ningún tipo de contaminante debido a que no existe evidencia de presencia de yeso y/o arcillas que repercutan en las propiedades de las mezclas asfálticas, así como en la adherencia de los áridos reciclados (AR) con el asfalto.

Por tanto, a la vista de los resultados se puede concluir que la muestra seleccionada procede de un árido natural calizo, con lo que se espera que su adhesividad con el asfalto sea buena [34]. Se pudo confirmar que el AR proviene de un hormigón ya carbonatado por la no existencia de portadita entre los compuestos encontrados en el estudio.

2.1 Diseño de mezclas asfálticas en caliente

Se realizaron tres mezclas asfálticas semidensas tamaño máximo 25mm (SD 25mm) con contenidos de árido reciclado de 0% (Mezcla Patrón), 40% y 60% de la fracción 5-10mm y con contenidos de asfalto de 4,0; 4,5 y 5,0%; las mismas fueron conformadas según lo planteado por el método de Marshall [35]. Por cada contenido de ligante asfáltico se conformaron 3 probetas con el fin de determinar densidad de cada una, huecos, estabilidad y deformación Marshall. Luego para un 5% de asfalto se realizaron seis probetas para determinar la resistencia al agua de las mezclas.

En la Figura 6 se muestran las granulometrías de las mezclas analizadas.

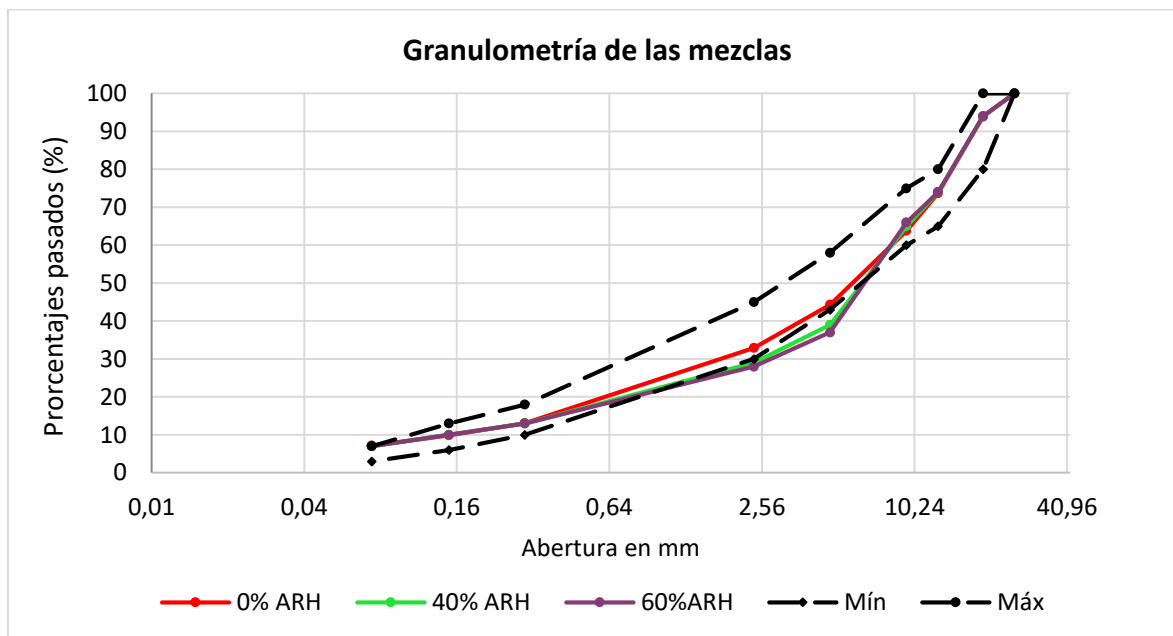


Figura 6: Granulometría de las mezclas

En la figura 6 se puede observar que la mezcla patrón cumple con las especificaciones propuestas en la NC 253: 2005 [28], sin embargo, esto no sucede para las mezclas con ARH, debido a que el mismo presenta una granulometría más gruesa que el árido natural en la fracción 5-10mm.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de la variación de los parámetros de las mezclas.

➤ Densidad

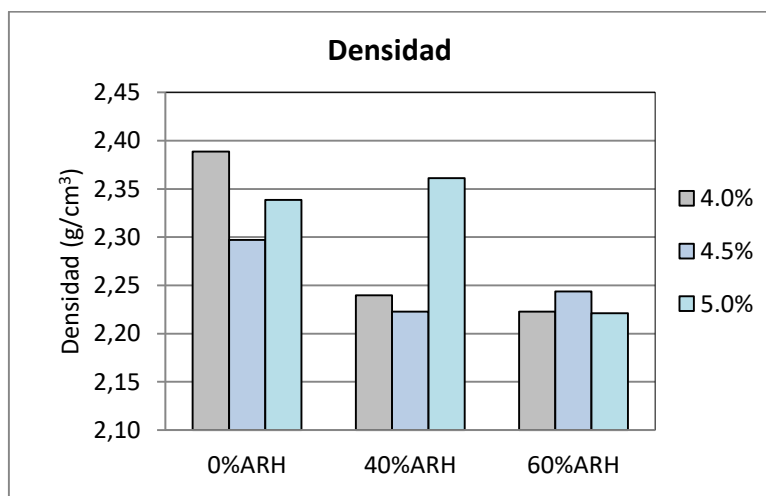


Figura 7: Densidad de las mezclas con diferentes porcentajes de ARH

En la Figura 7 se puede observar cómo a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado en las mezclas, las densidades disminuyen debido al bajo peso específico que presentan los áridos reciclados,

producto al mortero menos denso y más poroso adherido a la superficie de los mismos. Se nota además que ninguna mezcla presenta igual comportamiento, lo que se atribuye según algunos investigadores [14, 34] a la inestabilidad granulométrica que presentan los ARH lo que provoca que en el momento del mezclado y compactación varíe su esqueleto mineral.

➤ Huecos en la mezcla

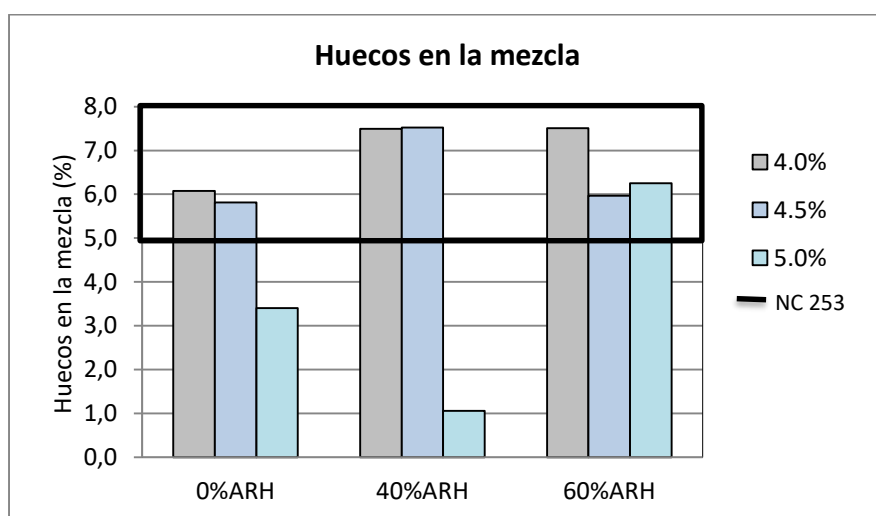


Figura 8: Porcentaje de huecos en la mezcla con diferentes porcentajes de ARH

En la Figura 8 se observa de manera general como a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado, los huecos en la mezcla aumentan debido a las bajas densidades. Al igual que sucede en la densidad de las mezclas, los huecos presentan un comportamiento diferente según cada contenido de asfalto para las distintas mezclas, fenómeno que se le atribuye igualmente a la inestabilidad granulométrica de los áridos reciclados. A pesar de la considerable disminución de la densidad, los valores de huecos en la mezcla cumplen con las especificaciones, exceptuando para el 5% de asfalto y el 40% de ARH. La mezcla con 60% de ARH es la que mejor comportamiento presenta ya que cumple con las especificaciones, mientras que la mezcla con 40% de ARH y la mezcla patrón solo cumplen para 4 y 4,5 % de asfalto.

➤ Huecos en los áridos

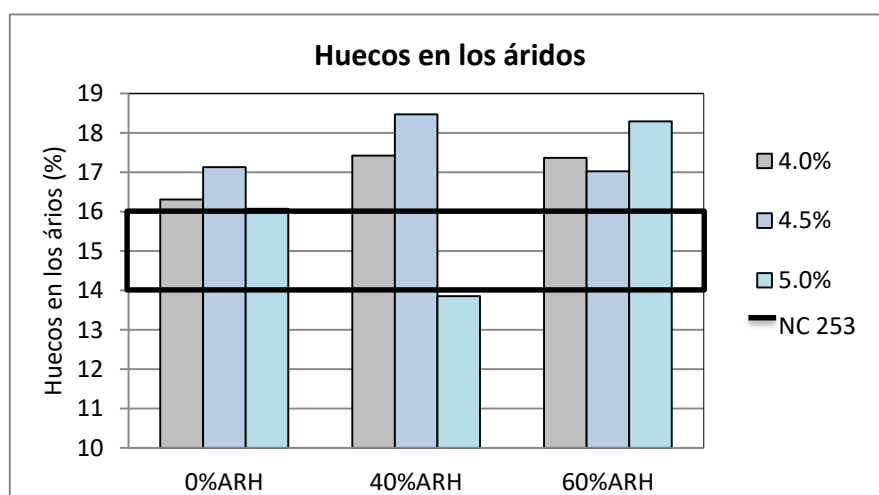


Figura 9: Porcentaje de huecos en los áridos con diferentes porcentajes de AHR

En la Figura 9 se nota de manera general que a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado, los huecos en los áridos aumentan debido a la alta porosidad que presentan los mismos. La mezcla patrón y la mezcla con 40% de ARH presentan el mismo comportamiento, no siendo así para la mezcla con 60%, lo cual se le atribuye al fenómeno de inestabilidad granulométrica explicado anteriormente. En este caso los valores de huecos superaron los establecidos en la NC 253: 2005 [28], como se ha planteado, el mortero que recubre la superficie de los áridos hace que estos sean muy porosos y necesiten mayor cantidad de asfalto para lograr una correcta lubricación; lo que será traducido posteriormente en una buena laborabilidad

y resistencia. Solo se cumplen las especificaciones en la mezcla patrón para un 5% de asfalto, mientras que en las mezclas con 40 y 60% de ARH no se cumplen para ningún contenido de asfalto.

➤ **Estabilidad**

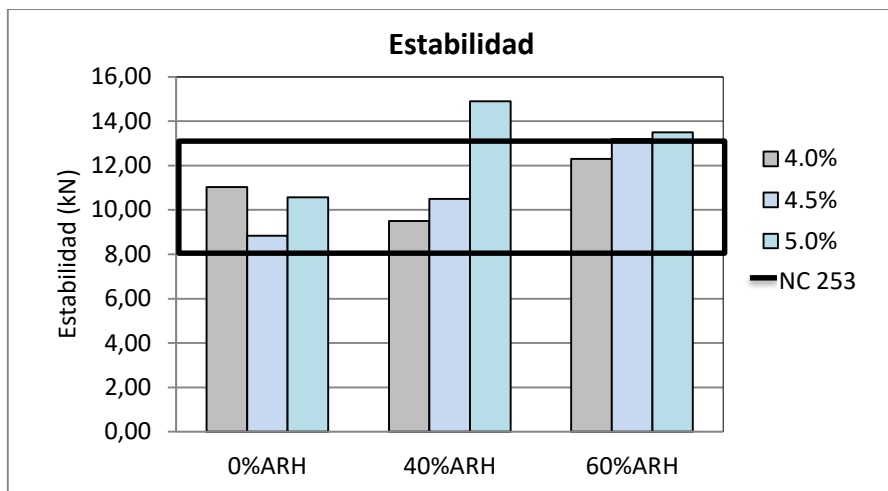


Figura 10: Estabilidad de mezclas con diferentes porcentajes de ARH

En la Figura 10 se observa que a medida que aumenta el porcentaje de ARH, aumentan las estabilidades debido a la buena afinidad del mortero adherido del árido reciclado con el asfalto. Todas las mezclas presentan buen comportamiento y cumplen con las especificaciones. Las mezclas con 40 y 60% de ARH tienen la misma tendencia, además de presentar las mayores estabilidades. La mezcla con 40% de ARH y 5% de asfalto es la que mejor estabilidad presenta, siendo además la de mejor resultado en la densidad; siendo incluso similares o superiores a los de la mezcla sin ARH. Significa que, para ese porcentaje de asfalto, con un 40% se alcanzan valores satisfactorios.

➤ **Deformación**

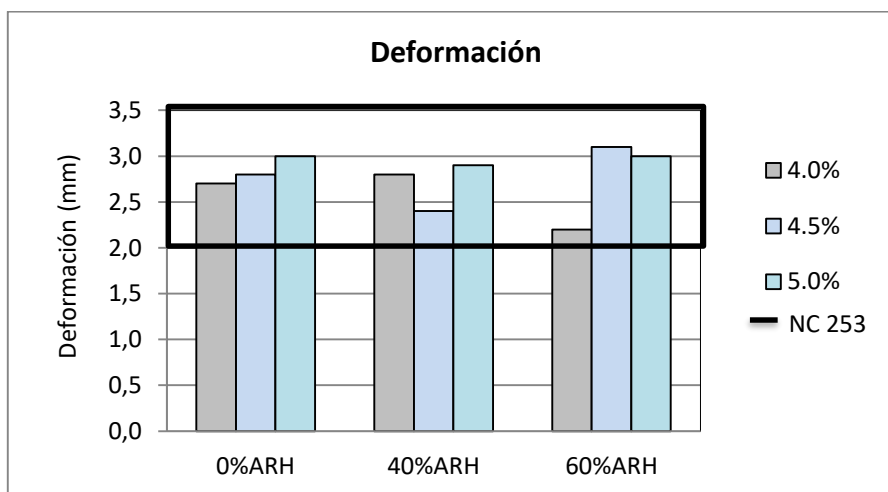


Figura 11: Deformación de mezclas con diferentes porcentajes de ARH

En la Figura 11 se observa que todas las mezclas cumplen con las especificaciones de la NC 253 [28] y presentan un buen comportamiento ante la deformación.

➤ **Resistencia al agua de las mezclas con ARH.**

Para el análisis de la resistencia al agua de las mezclas se confeccionaron 6 probetas, donde se analizaron tres de ellas para tracción indirecta en seco y las tres restantes tras inmersión. El ensayo se realizó para un 5% de asfalto.

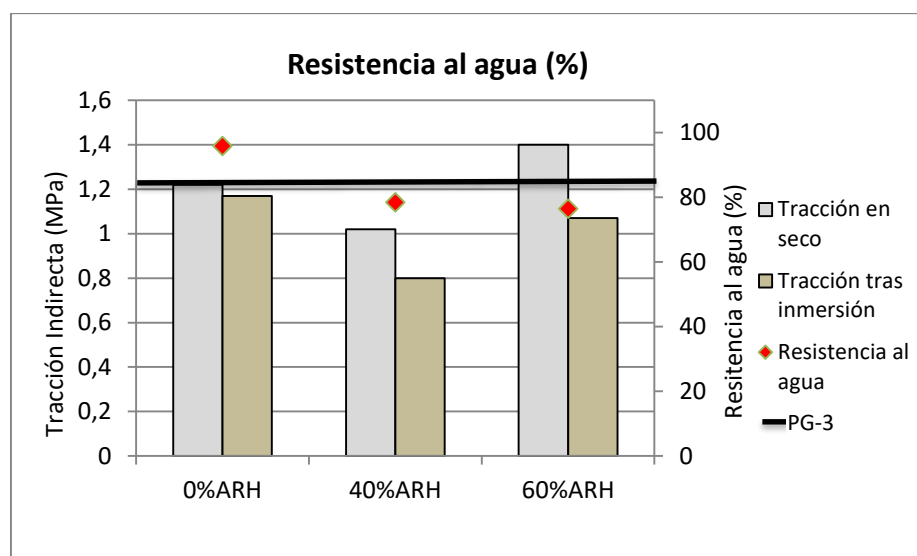


Figura 12: Resistencia al agua de mezclas con diferentes porcentajes de ARH.

En la Figura 12 se puede observar que para la mezcla con un 40% de sustitución de árido reciclado tanto la resistencia a la tracción indirecta en seco y tras inmersión de las mezclas disminuyen con respecto a la mezcla patrón, lo cual se le atribuye al mortero adherido en la superficie del ARH que debilita la unión entre el árido y el asfalto propiciando una pérdida de resistencia. Sin embargo esto no sucede para la mezcla con 60% de ARH, por tanto se evidencia que la afinidad que presenta el cemento adherido a la superficie del AR con el asfalto comienza a ponerse de manifiesto a partir de este porcentaje. La mezcla que presenta un mejor comportamiento ante la tracción en seco es la de un 60% de ARH.

Además se aprecia que las mezclas con ARH no cumplen las especificaciones propuestas para la resistencia al agua en el PG-3 [36], se evidencia la disminución de la misma a medida que aumenta el porcentaje de ARH, lo cual se atribuye a que al ser el ARH más poroso la película de asfalto que envuelve los áridos disminuye a medida que aumenta el porcentaje del mismo y por tanto provoca una mayor afectación del agua en las mezclas. Las mezclas con 40% de ARH y 60% no presentan entre ellas una gran variación de la resistencia al agua.

4 CONCLUSIONES

En el trabajo se demuestra la aplicabilidad de los RCD tipo hormigón en el diseño de mezclas asfálticas en caliente y la contribución a la disminución de vertederos y con ello al impacto negativo sobre el medio ambiente.

Las características de los áridos reciclados difieren de los naturales ya que presentan una elevada absorción de agua y menores pesos específicos; debido al mortero adherido a la superficie de los AR, influyendo también en la densidad y el porcentaje de huecos en las mezclas.

El estudio microscópico realizado al árido reciclado procedente de la demolición de una cubierta de hormigón armado demostró que está compuesto fundamentalmente por áridos naturales de origen calizo y procedente de residuos de hormigón, cuya composición química es homogénea sin presencia de arcillas.

Con el aumento del porcentaje de ARH en las mezclas asfálticas las densidades y la resistencia a la acción del agua disminuyen, en cambio aumentan los huecos en mezcla y en áridos, y la estabilidad.

Para las condiciones de diseño establecidas y los materiales empleados los mejores resultados se obtuvieron para la adición de un 60% de árido reciclado.

Se debe profundizar en otros estudios y parámetros de los ARH como la inestabilidad granulométrica, ya que como se plantea en investigaciones internacionales, influye en la variación de los parámetros volumétricos de las mezclas; lo cual se puso de manifiesto en este trabajo.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. P. Domínguez, "Modelo para la gestión integral del proceso de producción de áridos reciclados en la provincia Villa Clara," Tesis de grado, Departamento de Economía, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2016.
- [2] D. Acosta, R. Moll, and G. González, "Influencia de la utilización del RCD como árido en mezclas asfálticas en caliente," *Revista de Arquitectura e Ingeniería de Matanzas*, vol. 1, 2017.
- [3] A. M. R. Pasadín and I. P. Pérez, "Empleo de áridos recalcados pretratados con emulsión en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente," in *XII Jornada Nacional de Asfema: impacto de la conservación de carreteras en las emisiones de CO₂*, Madrid, 2017.
- [4] J. R. M. Martínez and R. R. C. Vanegas, "Aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD) para ser utilizados como agregados en el diseño de mezclas asfálticas en caliente," Tesis de grado, Ingeniería Civil, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2017.
- [5] I. Pérez and A. M. Rodríguez, "Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber," *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 405-414, 2017.
- [6] N. I. A.-. Sarra, H. K. A. Al-Baiti, S. E. S. Al-Maliky, and S. S. Alwan, "Use of Recycling Building Demolition waste As Coarse Aggregate in Hot Mix Asphalt," *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, vol. 21, pp. 63-76, 2014.
- [7] H. K. A. Al-Bayati, S. L. Tighe, and J. Achebe, "Influence of recycled concrete aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 130, pp. 200-214, 2018/03/01/ 2018.
- [8] H. K. A. Al-Bayati, S. L. Tighe, and J. Achebe, "Influence of recycled aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 130, pp. 200-214, 2018.
- [9] A. I. Kareem, H. Nikraz, and H. Asadi, "Evaluation of the double coated recycled concrete aggregates for hot mix asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 544-552, 2018.
- [10] Q. Peng, L. Wang, and Q. Lu, "Influence of recycled coarse aggregate replacement percentage on fatigue performance of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 169, pp. 347-353, 4/30/ 2018.
- [11] S. Singh, Ransinchung, S. Debbarma, and P. Kumar, "Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sargarcane Mill for production of concrete mixes," *Journal of Cleaner Production*, vol. 174, pp. 42-52, 2018.
- [12] D. A. Alvarez, A. A. Aenlle, A. J. Tenza-Abril, and S. Ivorra, "Influence of Partial Coarse Fraction Substitution of Natural Aggregate by Recycled Concrete Aggregate in Hot Asphalt Mixtures," *Sustainability*, vol. 12, 2020.
- [13] A. J. Tenza-Abril, J. M. Saval, V. E. García-Vera, A. M. Solak, T. R. Herráiz, and J. M. Ortega, "Effects of Using Mine Tailings from La Unión (Spain) in Hot Bituminous Mixes Design," *Applied Sciences*, vol. 9, p. 272, 2019.
- [14] D. Acosta, A. Alonso, and A. J. Tenza, "Laboratory evaluation of hot asphalt concrete properties with Cuban recycled concrete aggregates," *Sustainability*, vol. 10, 2018.
- [15] B. G. Meijide, "Aplicación sostenible de residuos de construcción y demolición como árido reciclado en mezclas bituminosas en frío," tesis doctoral, Departamento de métodos Matemáticos y de Representación, Universidad de Coruña, 2015.
- [16] A. M. R. Pasadín and I. Pérez, "Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 151-61, 2015.
- [17] P. J. Goy, "Estudio comparativo entre áridos reciclados de residuos de construcción y demolición y áridos comerciales para su uso como material granular en sub-base de carreteras," Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 2017.
- [18] Y. Liu, Y. Huang, W. Sun, H. Nair, D. S. Lane, and L. Wang, "Effect of coarse aggregate morphology on the mechanical properties of stone matrix asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 152, pp. 48-56, 2017.

- [19] E. Khoury, W. Ambrós, B. Cazacliu, and C. H. Sampaio, "Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability," *Construction and Building Materials*, vol. 175, pp. 705-713, 2018.
- [20] A. Akhtar and A. K. Sarmah, "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 262-281, 2018.
- [21] I. R. Echeverría, D. A. Alvarez, A. A. Aenlle, and J. M. Fournier, "Propiedades de los áridos reciclados para mezclas asfálticas en caliente," *Revista Ciencia y Construcción*. Vol. 1, No. 1, pp. 67-80, 2020.
- [22] A. M. P. Rodriguez and I. P. Pérez, "Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion," *Construction and Building Materials*, vol. 55, pp. 350-358, 2014.
- [23] S. Bhusal, X. Li, and H. Wen, "Evaluation of Effects of Recycled Concrete Aggregate on Volumetrics of Hot-Mix Asphalt," *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Record* vol. 2205, pp. 36-39, 2011.
- [24] H. Yang, J. Xia, T. J.R, and R. J. Flower, "Urban construction and demolition waste and landfill failure in Shenzhen, China," *Waste Management*, vol. 63, pp. 393-396, 2017.
- [25] J. Mills-Beale and Z. You, "The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 230-235, 2010.
- [26] J. Murali Krishnan and K. R. Rajagopal, "Thermodynamic Framework for the Constitutive Modeling of Asphalt Concrete: Theory and Applications," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16 pp. 155-166, 2004.
- [27] W.-J. Park, T. Kim, S. Roh, and R. Kim, "Analysis of Life Cycle Environmental Impact of Recycled Aggregate," *Applied Sciences*, vol. 9, 2019.
- [28] *Carreteras. Materiales bituminosos. Hormigón asfáltico caliente. Especificaciones*, O. N. d. Normalización, 2005.
- [29] "Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)," P. GEAR, Ed., ed., 2018
- [30] V. W. Y. Tam, M. Soomro, and A. C. Jorge, "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017)," *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 272-292, 2018.
- [31] A. Busari, E. Adeyanju, T. Loto, and D. Ademola, "Recycled Aggregate in Pavement Construction: Review of Literatures," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1378, 2019.
- [32] J.-H. Kim, J.-H. Sung, C.-S. Jeon, S.-H. Lee, and H.-S. Kim, "A Study on the Properties of Recycled Aggregate Concrete and Its Production Facilities," *Applied Sciences*, vol. 9, 2019.
- [33] A. Radević, I. Isailović, M. P. Wistuba, D. Zakić, M. Orešković, and G. Mladenović, "The Impact of Recycled Concrete Aggregate on the Stiffness, Fatigue, and Low-Temperature Performance of Asphalt Mixtures for Road Construction," *Sustainability*, vol. 12, 2020.
- [34] A. M. Rodríguez, "Sensibilidad al agua y propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos," tesis de doctorado, Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación, Universidad de Coruña, 2013.
- [35] *Determinacion del contenido óptimo de asfalto empleando el equipo marshall*, O. N. d. Normalización, 2005.
- [36] *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y puentes* 2015.