

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.

Amanda M. Díaz Ramos¹, Debora Acosta Alvarez²

¹ Estudiante de Ingeniería, 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.

² Máster, Ingeniera Civil, 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

RESUMEN

La contaminación ambiental debido a la deposición de residuos de construcción y demolición (RCD) es uno de los agentes que más perjudica a la sociedad hoy en día, pero el ingenio de la humanidad los está logrando convertir en una fuente de materiales de la construcción, al utilizarlos como áridos reciclados (AR). A nivel mundial se han desarrollado diversas investigaciones y trazado líneas de trabajo para conseguir utilizar los RCD como agregados en mezclas asfálticas y a su vez cubrir las necesidades de materia prima y minimizar el impacto de los vertederos. Los áridos reciclados provenientes de residuos de hormigón (ARH) difieren de los áridos naturales (AN) esencialmente por una capa de mortero adherido a su superficie. La investigación tiene como objetivo evaluar las propiedades de los ARH de distintas fuentes estudiadas para su uso en mezclas asfálticas en caliente. Se analizan propiedades como: peso específico, absorción, granulometría, tamiz 200, coeficiente de los Ángeles y partículas planas y alargadas tanto en la fracción fina (0-5mm) como gruesa (5-10mm). Además se realizó un estudio microestructural de los residuos. Se analizaron muestras provenientes de varias fuentes, todas a partir de demoliciones de estructuras de hormigón o restos de elementos prefabricados y probetas, usando distintos tipos de trituración. Se obtuvo como resultado que los ARH presentan menor: peso específico, porcentaje de tamiz 200, resistencia a la abrasión; así como mayor: porcentaje de absorción, equivalente de arena y partículas planas y alargadas que los especificado en la NC 253: 2005.

Palabras claves: áridos reciclados, mezclas asfálticas, residuos de construcción y demolición.

ANALYSIS OF PROPERTIES IN RECYCLED CONCRETE AGGREGATES FOR HOT ASPHALT MIXTURES.

ABSTRACT

One of the most harmful agents of society and the environment is the contamination caused by the disposal of construction and demolition waste (CDW), however, with society's ingenuity, these residues are being turned into recycled aggregates (RA) which cause less harm to the environment. There have been several investigations conducted worldwide to minimize the harmful agents produce by CDW and as a result of these investigations different fields of work have developed to use construction and demolition waste as aggregates in asphalt mixtures. Recycles aggregates that derived from concrete residues (RCA) differ from natural aggregates because they have a layer of mortar adhered to their surface. This research aims to evaluate the properties of (RCA) for its use in hot asphalt mixtures by analyzing different sources of information. The investigation discusses properties such as absorption, granulometry, sieve 200, coefficient of the Angeles, and the presence of flat and elongated particles including fine (0-5mm) and coarse (5-10mm) particles. In addition, a microstructural study of the residues was carried out and samples from multiple sources were analyzed. The samples include information from demolitions of concrete structures to remains of precast elements and test tubes, using many different types of trituration. It was concluded that (RCA) presents lower: weight, percentage of sieve 200, resistance to abrasion; as well as higher: percentage of absorption, equivalent of sand and flat and elongated particles than those specified in NC 253: 2005.

Keywords: recycled aggregates, asphaltic mixtures, construction and demolition waste.

Nota Editorial: Recibido: diciembre 2020; Aceptado: enero 2021

1- INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es una de las mayores generadoras de residuos en la actualidad, sin embargo, históricamente ha sido un pilar necesario para el desarrollo de las comunidades [1]. A estos residuos que resultan de la construcción, remodelación, reparación y demolición de viviendas, edificios y otras estructuras se les denomina 'Residuos de Construcción y Demolición (RCD)'; los mismos constituyen un problema social, técnico y medioambiental producto al gran volumen de residuos generados anualmente [2]. Debido a la problemática por la generación de estos residuos a nivel mundial, se han ido implementando estrategias y medidas para su gestión. A nivel internacional dicha gestión se ha enfocado principalmente en las denominadas 3R: reducir, reutilizar y reciclar los RCD [3]. Una manera muy efectiva de disminuir estos volúmenes de escombros que contaminan la ciudad y darles un uso ecológico, racional y económico es su utilización como áridos reciclados (AR).

El uso de los RCD en la construcción de pavimentos puede ser una solución viable para preservar el consumo de recursos naturales, cubrir las necesidades de materia prima y minimizar el impacto de los vertederos [4-7]. La utilización de AR es cada vez más habitual en el campo de la construcción, en ámbitos muy variados como son la construcción de explanaciones (terraplenes y rellenos) [4, 5], capas de carreteras [6-9], en la fabricación de hormigón [10-13] y además se han obtenido resultados satisfactorios en las mezclas asfálticas en caliente [14-21].

Existen varios tipos de AR dependiendo del material original del cual procedan; estos pueden ser de origen cerámico, asfáltico, hormigón y mixto. Los áridos procedentes de residuos de hormigón (ARH), difieren esencialmente de los áridos naturales (AN), debido a una capa de mortero adherida a su superficie. Las propiedades de los ARH dependen de varios factores entre los que se encuentran: el grado de limpieza del árido, el origen del RCD y las propiedades de los materiales originales [22-24], principalmente de las características del hormigón que se tritura, como: resistencia, relación agua/cemento, tamaño máximo del árido, características de la roca natural, y del método de procesamiento utilizado para la obtención de los AR, incluyendo el tipo y la cantidad de trituradoras empleadas [25-27]. Estas razones traducidas en la cantidad de mortero adherido que presentan los ARH hace que los mismos se distingan de los áridos naturales por su mayor porosidad, superficie áspera e irregular, bajo peso específico, gran porcentaje de poros, elevada absorción de agua, menor resistencia mecánica y menor durabilidad que los áridos naturales [27-31].

Para ratificar este planteamiento Sánchez de Juan y Guitiérrez [32] estudiaron 15 tipos de muestras de ARH diferentes y llegaron a la conclusión que la cantidad de mortero adherido en la fracción fina es mayor que en la fracción gruesa: los rangos se encuentran entre 23-44% para la fracción 8-16mm y entre 33-55% para la fracción 4-8mm, lo que además muestra la gran heterogeneidad de los ARH. Algunos autores [32, 33] además afirman que cuanto mayor es el contenido de mortero adherido, menor será la densidad. Por ello, las diferencias entre las densidades del ARH y del AN son mayores en las fracciones finas, ya que estas últimas presentan un mayor contenido de mortero. Chávez [34] ha investigado que la presencia de mortero adherido a las partículas de árido natural produce una modificación en la forma de las partículas de los ARH, resultando valores menores para el índice de lajas y similares o superiores para el índice de elongación en los áridos reciclados gruesos con respecto a los áridos naturales gruesos, así mismo el desgaste de los AR se encuentra condicionado por el tamaño de las partículas, el procesamiento empleado en la planta y la resistencia del hormigón de origen [34].

En Cuba se ha hecho inminente la reutilización de RCD debido al impacto negativo que estos ocasionan al medio ambiente. Con el decursar de los años la política ambientalista ha tomado auge, y debido al desconocimiento o desentendimiento por parte de la población y entidades, de la clasificación y utilización de materias primas se han creado vertederos. Para tal efecto, se plantea una línea de análisis, la del aprovechamiento de los residuos de demolición para incorporarlos como agregados en la realización de mezclas asfálticas de pavimentos flexibles, dándole así solución a dos situaciones importantes: la inadecuada disposición final que se les da a estos residuos [14], y la disminución de la explotación de canteras para la extracción de áridos naturales.

El objetivo de esta investigación consiste en realizar un análisis a las características de los ARH para su uso en mezclas asfálticas en caliente realizando una comparación con las especificaciones propuestas en la NC 253:2005 [35]; además se estudia la incidencia de las características del hormigón de origen y el proceso de trituración en las mismas. Se analizan propiedades como peso específico, absorción, granulometría, tamiz 200, coeficiente de los Ángeles y la presencia de partículas planas y alargadas tanto en la fracción fina (0-5mm) como en la fracción gruesa (5-10mm). Se estudiaron para esto muestras provenientes de: probetas de

hormigón ENIA (ARH_{PE}), demolición de acera: CUJAE y Capitolio (ARH_{Dacera} y ARH_{DCapitolio}), demolición de losa (ARH_L), residuos de losa Spiroll (ARH_{LS}), hormigón suelto proveniente de una planta de prefabricado (ARH_S), demolición de Alicante (ARH_{DA}), probetas de hormigón (ARH_{PH}) y vigas Pretensadas (ARH_{VP}). También, se realizó un estudio microestructural donde se observan las fases mineralógicas de los residuos y la morfología de los mismos.

2- DESARROLLO

2.1 Materiales a emplear

Se analizaron residuos provenientes de ocho fuentes diferentes, con distintos tipos de trituraciones y materiales; para estudiar la influencia de cada uno de estos parámetros en las propiedades de los ARH. Las muestras provinieron de demoliciones de estructuras de hormigón o restos de elementos prefabricados y probetas. Se analizaron las propiedades tanto en la fracción fina (0-5mm) como en la fracción gruesa (5-10mm) siguiendo lo planteado en las normas cubanas donde se describe cada ensayo. A continuación se presenta la relación de propiedades estudiadas y las normas por las cuales se rigió el desarrollo de los ensayos:

- Granulometría: NC 178: 2002 [36]
- Peso específico y Absorción: NC 186: 2002 [37]
- Tamiz 200: NC 182: 2002 [38]
- Equivalente de arena NC 886: 2012 [39]
- Partículas planas y alargadas: NC 189: 2002 [40]
- Coeficiente de los Ángeles: NC 188: 2002 [41]

Además se realizó un estudio microestructural de algunos de los residuos para observar la morfología de los mismos y conocer las fases mineralógica que los componen.

Para analizar la morfología del árido reciclado, se empleó la microscopía electrónica. Las imágenes que se obtienen en el microscopio electrónico de barrido corresponden a electrones secundarios o electrones retrodispersados emitidos tras la interacción con la muestra de un haz incidente de entre 5 y 30 KeV. Antes de la observación, las muestras se secaron en horno a 70°C hasta peso constante y luego fueron recubiertas con la aleación Au-Pd (oro-plomo).

Para identificar las fases mineralógicas del residuo, este fue reducido a tamaño <63mm usando un molino de bolas modelo Retsch PM 100. Para el análisis se utilizó una aceleración de voltaje de 40Kv, una corriente de 40mA y un barrido angular de 4° a 60°. Las fases mineralógicas de las muestras fueron cuantificadas por medio de análisis de Rietveld usando el software PANalytical Highscore Plus 4.6.

2.2.1 Descripción de las muestras obtenidas de áridos reciclados

Para el desarrollo de esta investigación se contó con cinco muestras de ARH en la fracción fina (0-5mm) y 12 muestras en la fracción gruesa (5-10mm). Cada muestra se separó en tres submuestras para garantizar la repetitividad y representatividad de los resultados.

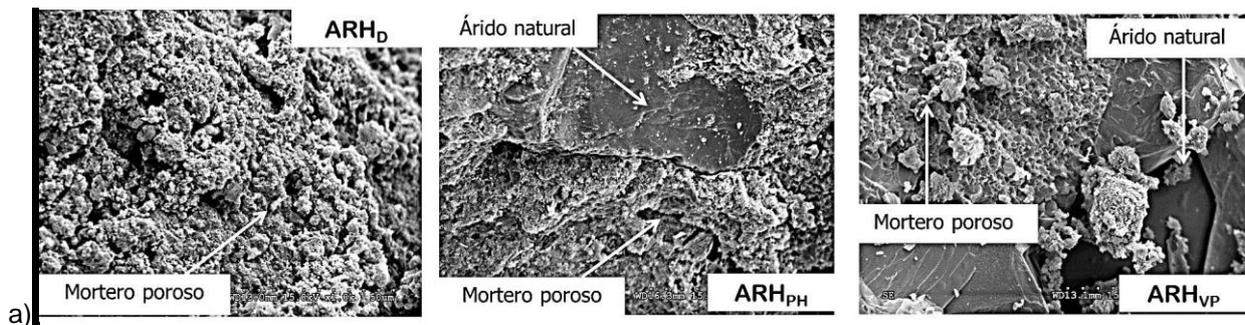
La descripción detallada de cada una de las muestras analizadas se describe en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción de las muestras analizadas

Fracción	Identificación	RCD	Forma de obtención
Fina (0-5mm)	ARH _{PE}	Probetas de hormigón de la ENIA	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 0-5mm
	ARH _{Dacera}	Demolición de una acera de la CUJAE	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 0-5mm.
	ARH _{Hlosa}	Demolición de restos de losa Spiroll	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 0-5mm.
	ARH _{HS}	Hormigón suelto de la planta de prefabricado de Losas Spiroll	Tamizado entre 0-5mm
	ARH _{Htrit>10}	Hormigón suelto >10mm de la planta de prefabricado de Losas	Triturado con una trituradora de mandíbulas y tamizado entre 0-5mm
Gruesa (5-10mm)	ARH _{PE1}	Probetas de hormigón procedentes de la ENIA muestreo 1	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 5-10mm.
	ARH _{PE2}	Probetas de hormigón procedentes de la ENIA muestreo 2	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 5-10mm.
	ARH _{Dacera}	Demolición de una acera de la CUJAE	Triturado con de mandíbulas y tamizado entre 5-10mm.
	ARH _{Dlosa}	Demolición de una losa de cubierta de hormigón	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 5-10mm.
	ARH _{HS}	Hormigón suelto de la planta de prefabricado de Losas Spiroll	Tamizado entre 5-10mm
	ARH _{Htrit>10}	Hormigón suelto de la planta de prefabricado de Losas Spiroll	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 5-10mm
	ARH _{Htritodo}	Hormigón suelto de la planta de prefabricado de Losas Spiroll	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 5-10mm
	ARH _{Hlosa}	Restos de losa Spiroll	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 5-10mm.
	ARH _{DCapitolio}	Demolición de acera del Capitolio	Triturado con mandíbulas y tamizado entre 5-10mm.
	ARH _{D.}	Demolición de Alicante	Tamizado entre 5-10mm
	ARH _{PH}	Probetas de hormigón de planta de prefabricado de Alicante	Trituración por impacto y tamizado entre 5-10mm.
ARH _{VP}	Restos de vigas Pretensadas	Triturado con martillo y tamizado entre 5-10mm.	

2.2.2 Caracterización microestructural y mineralógica de los residuos utilizados

Para la caracterización microestructural se realizaron ensayos de microscopía electrónica de barrido para observar la morfología de algunos de los áridos reciclados, así como se analizaron las fases mineralógicas y compuestos químicos de algunos de los residuos utilizados.



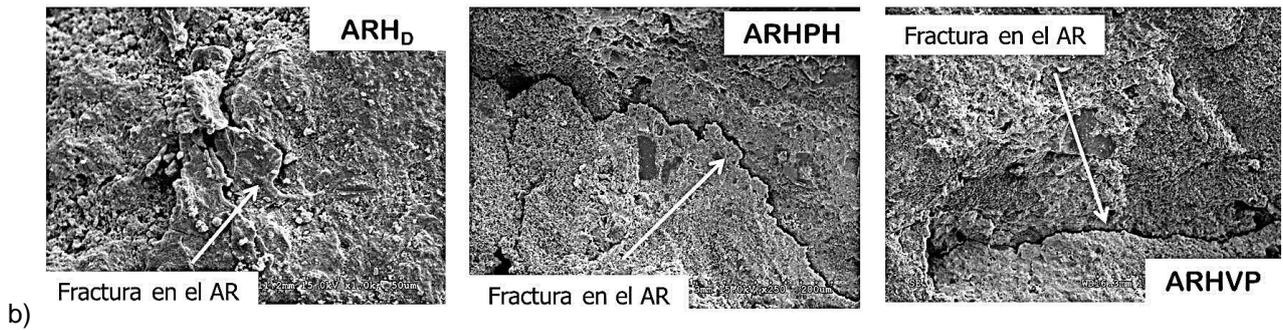
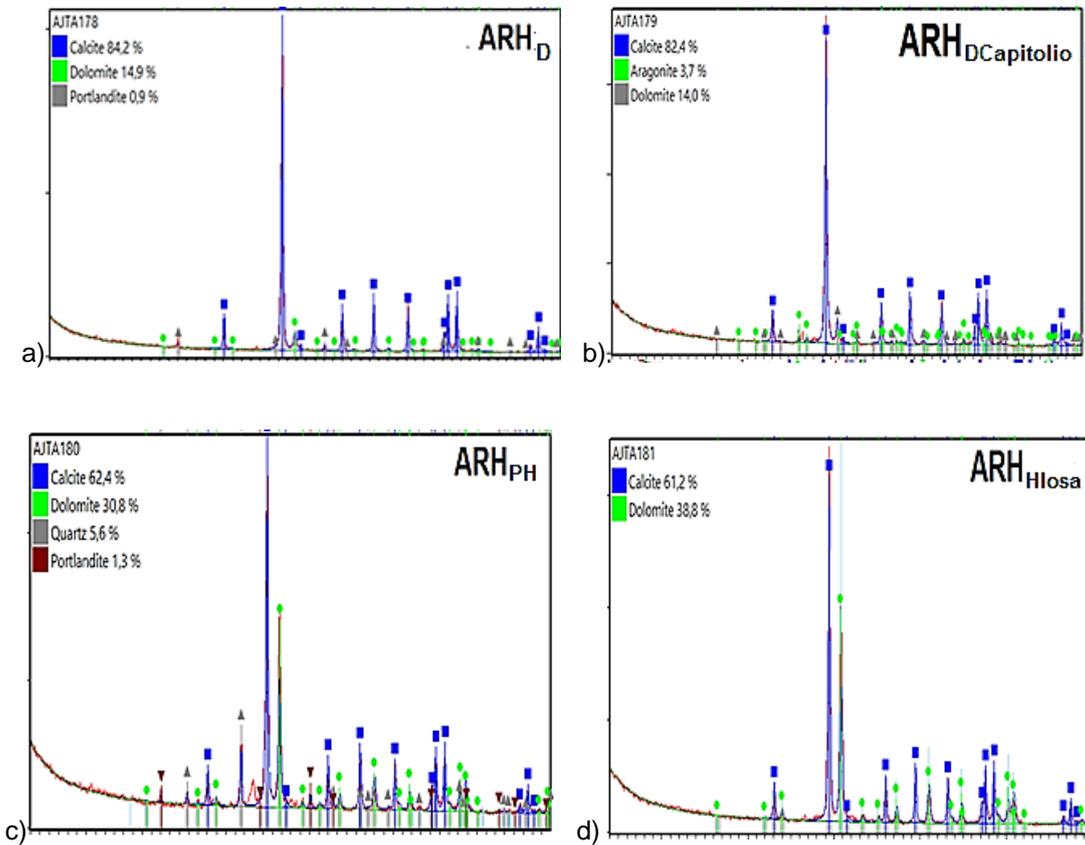


Figura 1. Micrograffías de la microscopía electrónica de la exploración (SEM) de los residuos a) Mortero adherido en la superficie del AR b) Fractura presente en el AR.

En la figura 1 se puede observar la morfología de algunos de los residuos utilizados, donde se aprecian fracturas en el árido reciclado (figura 1b) que pueden ocasionar como algunos autores [42, 43] refieren cambios en la distribución granulométrica inicial; además puede distinguirse el mortero más poroso y rugoso adherido al árido natural (figura 1a).

A continuación, en la figura 2 se muestran difractogramas de rayos X (DRX) de algunos de los residuos utilizados.



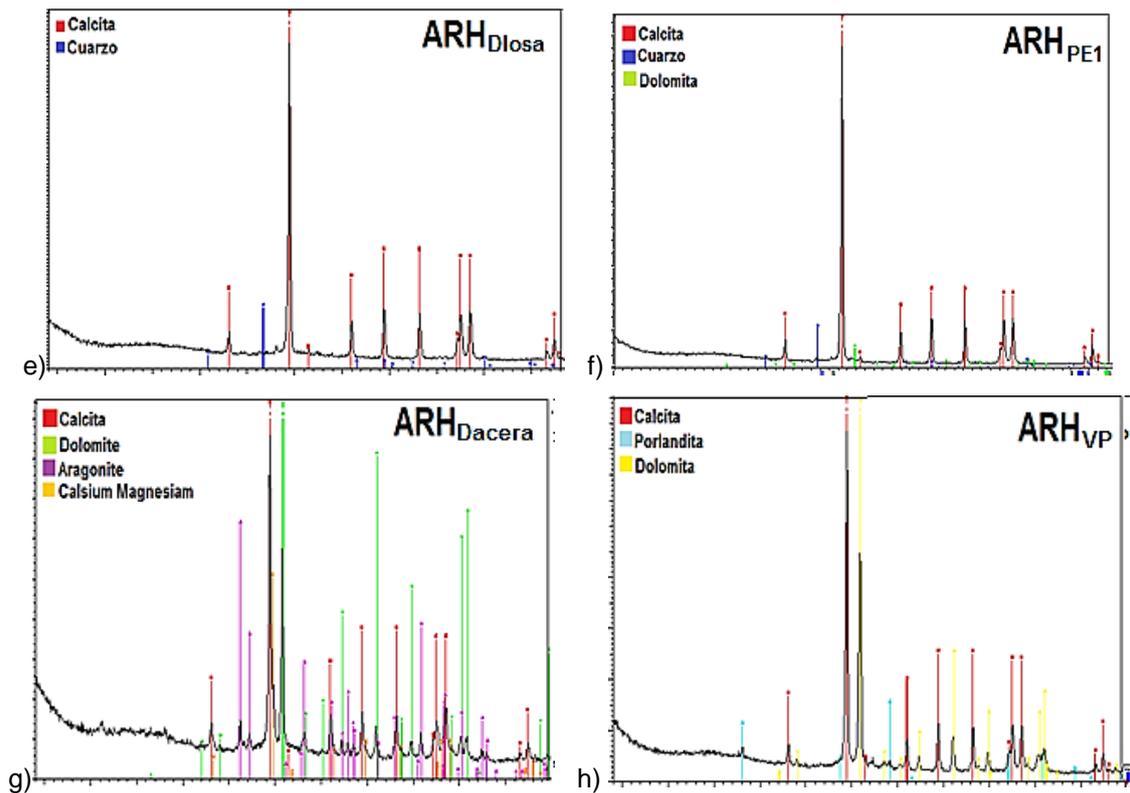


Figura 2. Composición mineralógica de los residuos a) ARH_D b) ARH_{DCapitolio} c) ARH_{PH} d) ARH_{Hlosa} e) ARH_{Dlosa} f) ARH_{PE1} g) ARH_{Dacera} h) ARH_{VP}.

En los difractogramas mostrados en la figura 2 se aprecia que el principal componente de los residuos es la Calcita por tener un mayor porcentaje en todas las muestras, mineral formado por carbonato cálcico (CaCO_3), compuesto primario de los hormigones, cuyos áridos naturales son de origen calizo. A continuación le sigue la dolomita, presente en la mayoría de los residuos, propio de áridos de origen calizo; también se observan otros minerales con menores porcentajes como son: la portlandita, mineral resultante de la hidratación del silicato bicálcico y del silicato tricálcico del cemento portland; la aragonita, forma cristalina del carbonato de calcio (CaCO_3); el cuarzo, compuesto de sílice, el cual es uno de los más comunes de la corteza terrestre y por último el magnesio de calcio. De manera general se aprecia que los residuos son todos provenientes de materiales pétreos de origen de hormigón, resultando además los residuos ARH_D, ARH_{PH} y ARH_{VP} ser provenientes de hormigones aún no carbonatados debido a la existencia en ellos de portlandita. Además no presentan contaminantes que puedan afectar las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente.

3- RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos realizados a las muestras de áridos tomadas, cada una de estas fue dividida en tres submuestras para lograr la repetitividad y representatividad de los resultados de los ensayos.

3.1 Fracción fina (0-5mm)

- ✓ Granulometría

Se puede observar en la figura 3 que solo la muestra de ARH_{HS} tiene un porcentaje pasado menor que el mínimo especificado, debido a que es un material suelto el cual no fue triturado, presenta una distribución granulométrica distinta a la de aquellos materiales que fueron sometidos a un proceso de molienda. Además, aunque las muestras ARH_{HS}, ARH_{Htrit>10} y ARH_{HLosa} proceden del mismo tipo de hormigón, la primera se encuentra en un grupo diferente de las dos últimas, lo cual como se planteó anteriormente es producto a que esta muestra no fue sometida a un proceso de trituración. Por lo que se nota que tanto el proceso de trituración influye en la granulometría final.

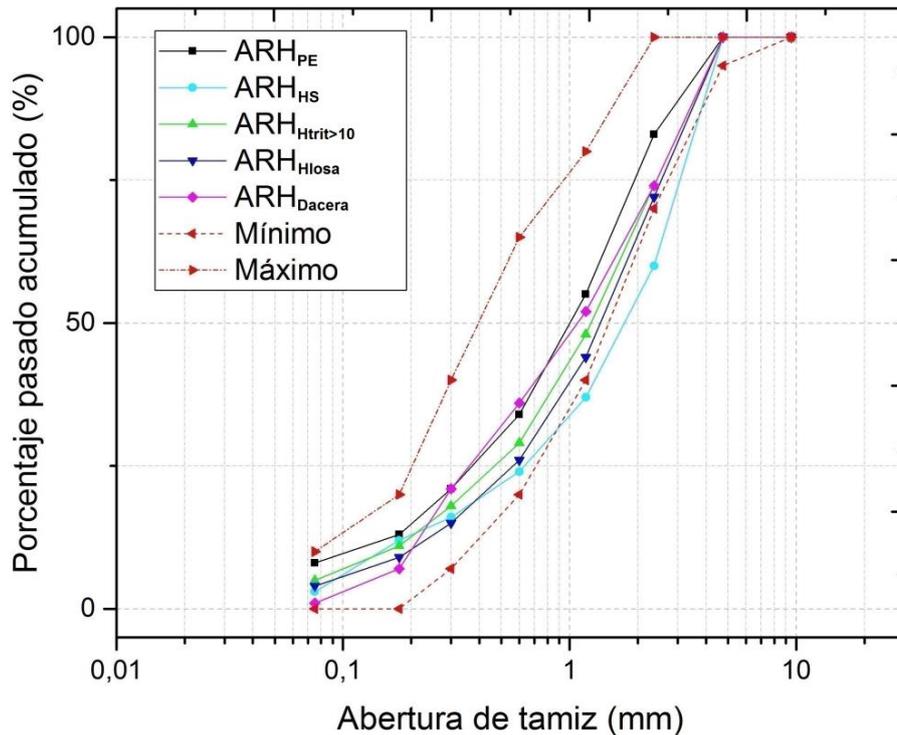


Figura 3: Granulometrías de las muestras de ARH en la fracción fina (0-5mm). El Máximo y Mínimo corresponden a las especificaciones propuestas en la NC 253:2005.

✓ Peso específico.

En la figura 4 se puede observar que todas las muestras de ARH están por debajo del límite especificado en la NC 253: 2005 [35], lo cual se debe principalmente al mortero menos denso y más poroso adherido en la superficie de cada una de estas. Se pueden observar además las medias de los valores de las muestras y la desviación de cada una de ellas; donde se evidencia que existen diferencias significativas entre ellas, exceptuando la de ARH_{PE} y ARH_{Htrit>10} a pesar de provenir de diferentes tipos de hormigones. Además se observa que las muestras ARH_{HS}, ARH_{Htrit>10} y ARH_{Losa} a pesar de proceder del mismo tipo de hormigón, presentan diferencias significativas entre ellas; debido a que las dos últimas fueron trituradas mientras la primera solo fue sometida al tamizado; de la misma manera ARH_{Htrit>10} y ARH_{Losa} también presentan diferencias entre ellas debido a que ARH_{Losa} en el proceso de construcción del material original fue sometida a compactación y curado mientras no sucedió lo mismo con ARH_{Htrit>10}. Aunque en todas las muestras que fueron trituradas se utilizó el mismo tipo de molino, ellas presentan diferencias significativas entre sí.

De lo planteado anteriormente se infiere que no solo el tipo de trituración influye en el peso específico sino además las características de los materiales originales de los cuales provengan esos ARH y el proceso tecnológico al que fueron sometidos los elementos en su proceso de fabricación. Todos los pesos específicos se encuentran en el entorno de 2,15-2,4g/cm³.

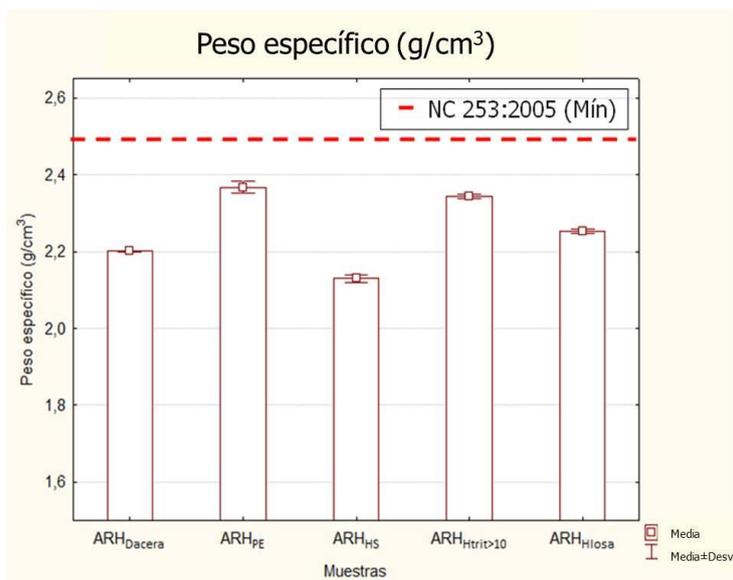


Figura 4. Peso específico de las muestras de ARH analizadas en la fracción fina

✓ Absorción

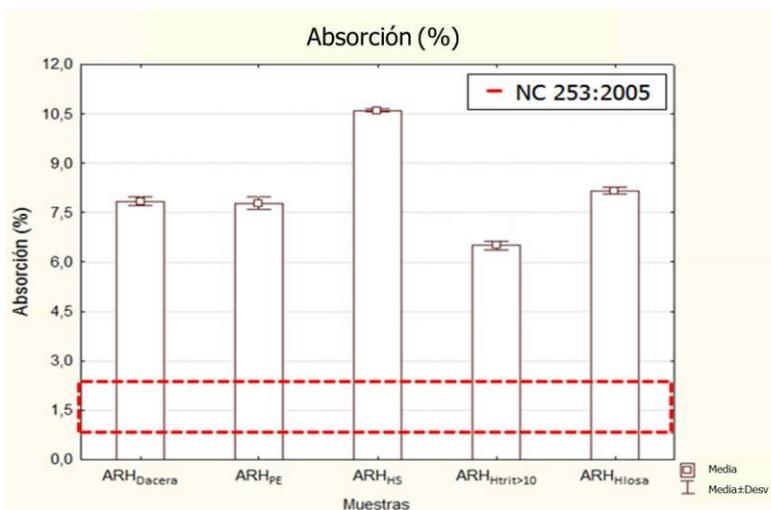


Figura 5. Porcentaje de absorción de las muestras de ARH analizadas en la fracción fina.

En la figura 5 se puede observar que todas las muestras de ARH tienen un porcentaje de absorción mayor que el planteado en la NC 253: 2005 [35], lo cual se debe al mortero adherido ya que es un material con una gran cantidad de poros permeables y de muy baja densidad. Se puede apreciar que la muestra ARH_{HS} tiene mayor porcentaje de absorción que el resto, puesto que es la que menor peso específico presenta, además al ser un material suelto el cual no fue triturado presenta una mayor cantidad de mortero poroso adherido a su superficie. En el caso de las muestras restantes que fueron trituradas con el mismo tipo de molino, las medias de los valores y la desviación de cada una de ellas indican que existen diferencias significativas, exceptuando la de ARH_{Dacera} y ARH_{PE} a pesar de no provenir del mismo tipo de hormigón y de tener pesos específicos muy diferentes. Como mismo sucede en el peso específico las muestras ARH_{HS}, ARH_{Htrit>10} y ARH_{Losa} a pesar de proceder del mismo tipo de hormigón, presentan diferencias significativas entre ellas; poniendo de manifiesto nuevamente que no solo el tipo de trituración influye en la absorción sino además las características de los materiales originales que presenten estas muestras. Todos los porcentajes de absorción se encuentran en el entorno de 6,2-10,6%.

✓ Equivalente de arena

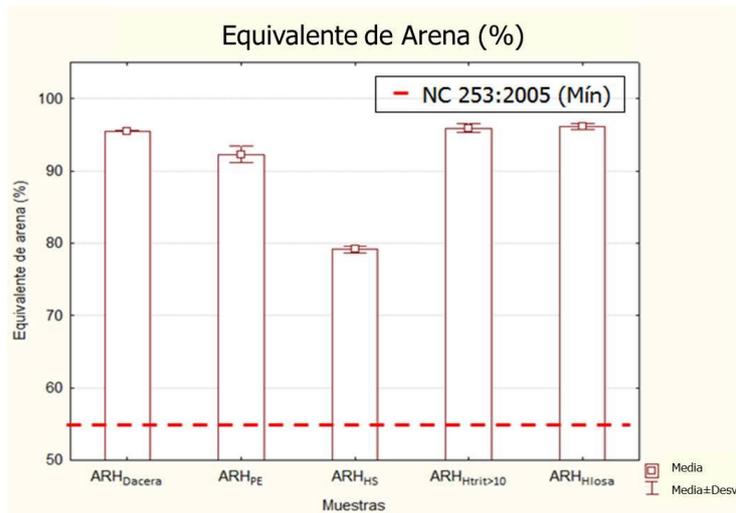


Figura 6. Equivalente de arena de las muestras de ARH analizadas en la fracción fina.

Como se observa en la figura 6 las muestras de ARH cuentan con porcentajes de equivalente de arena dentro del límite especificado por la NC 253: 2005 [35], lo cual se debe principalmente a que la fracción fina del ARH está formada exclusivamente por mortero, por lo que se obtienen valores de Equivalente de Arena (EA) elevados. Se puede apreciar que las muestras ARH_{Dacera}, ARH_{PE}, ARH_{Htrit>10} y ARH_{Hlosa} las cuales fueron trituradas utilizando una trituradora de mandíbulas, presentan valores similares y mayores que la muestra ARH_{HS}, material suelto el cual no fue triturado, mientras entre ARH_{Htrit>10} y ARH_{Hlosa} no existen diferencias, ambas muestras proceden del mismo tipo de hormigón aunque no fueron sometidas a igual proceso tecnológico de fabricación. Se puede inferir de esto que, el proceso de trituración influye en el equivalente de arena. El Equivalente de Arena se encuentra en el entorno de 78-97%.

✓ Tamiz 200

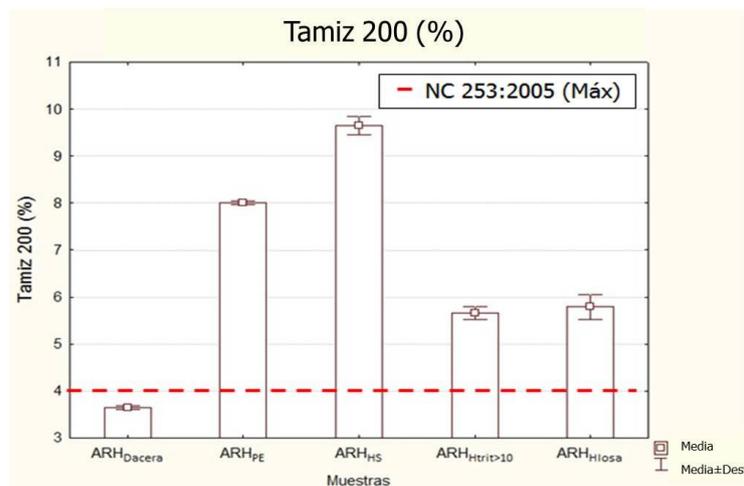


Figura 7. Tamiz 200 de las muestras de ARH analizadas en la fracción fina

En la figura 7 se muestra que los ARH no cumplen con las especificaciones planteadas en la NC 253: 2005 [35] excepto ARH_{Dacera} que se encuentra dentro de los valores límites. Se pueden observar además las medias de los valores de las muestras y la desviación de cada una de ellas lo que indica que no existen diferencias significativas entre ARH_{Htrit>10} y ARH_{Hlosa} provenientes de un mismo tipo de hormigón e igual proceso de trituración; sin embargo las restantes muestras que fueron igualmente trituradas presentan valores de tamiz 200 diferentes significativamente; lo que indica en este caso que las características de los materiales originales influyen en este parámetro. Todos los porcentajes de tamiz 200 se encuentran en el entorno de 3,5-10%.

3.2 Fracción gruesa (5-10mm)

Para el análisis de las propiedades de la fracción gruesa, se deciden agrupar las muestras según la resistencia característica de los hormigones, debido a la importancia que representa este parámetro en la dureza de los áridos gruesos y el papel que juega en el desempeño en las mezclas asfálticas en caliente.

✓ Granulometría

En la figura 8 se pueden observar tres grupos básicos de granulometrías donde: en un primer grupo la muestra ARH_{PE1} no cumple con las especificaciones y tiende a ser un material más fino que lo requerido por la NC 253: 2005 [35]; un segundo grupo de muestras que no cumplen con las especificaciones entre las que se encuentran ARH_{PE2}, ARH_{PH}, ARH_{Dacera}, ARH_{VP} y ARH_D, notándose una mayor diferencia en ARH_D y ARH_{VP} del resto; el tercer grupo cumple con las especificaciones y está compuesto por las muestras ARH_{Losa}, ARH_{Htritudo}, ARH_{Htrit>10}, ARH_{HS} y ARH_{Dlosa}, donde las primeras cuatro proceden de un mismo tipo de hormigón. En este caso se puede observar que dentro de un mismo grupo existen muestras de diferentes materiales y tipo de trituraciones, por el contrario en grupos diferentes se observan muestras del mismo tipo de trituración; lo cual lleva a arribar a la conclusión de que la granulometría del ARH grueso depende en gran medida de las características intrínsecas del material de origen y del tipo de trituración empleada.

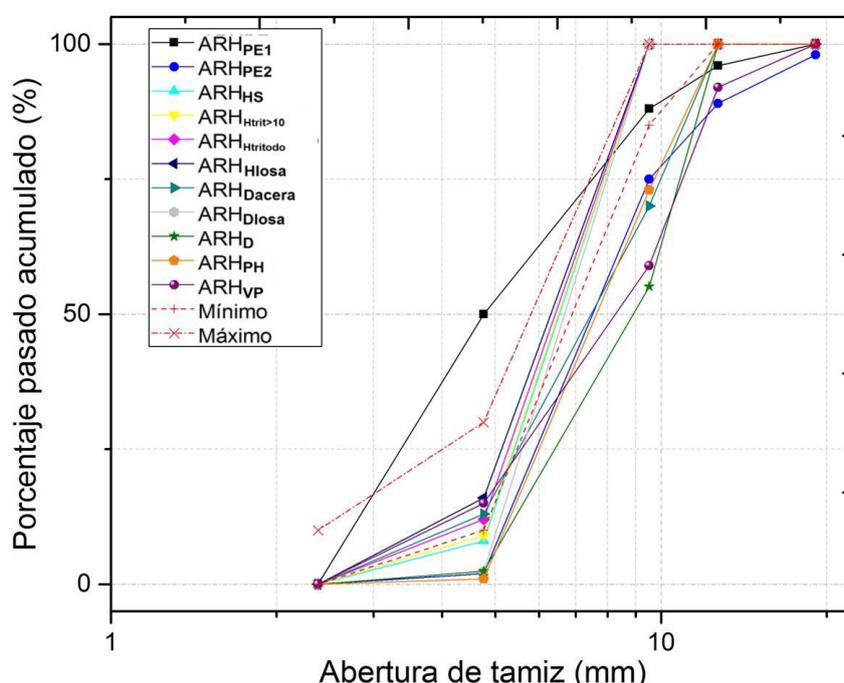


Figura 8. Granulometría de las muestras de ARH analizadas en la fracción gruesa. El Máximo y Mínimo corresponden a las especificaciones propuestas en la NC 253:2005.

✓ Peso específico

Se observa en la figura 9 que todas las muestras de ARH están por debajo del límite especificado en la NC 253: 2005 [35] debido a la capa de mortero que recubre las partículas de ARH. La diferencia entre estas muestras radica principalmente en que algunas fueron sometidas a diferentes procesos de trituración y otras son materiales sueltos. Se aprecia que la muestra de ARH_{PH} que se obtuvo utilizando trituración por impacto presenta mayor peso específico ya que este tipo de trituración logra un mayor desprendimiento del mortero adherido, dejando expuesto el árido en su forma natural. Se pueden observar también las medias y las desviaciones estándar de los valores de cada muestra, lo que indica que dentro de un mismo grupo de resistencia del hormigón original existen diferencias significativas entre los pesos específicos de las muestras analizadas; además existen muestras que aunque de diferentes resistencias originales no presentan diferencias significativas entre ellas. Por otra parte, se aprecia que para un mismo tipo de material original pero diferentes procesos de obtención hay diferencias significativas entre las muestras. Las muestras ARH_{Htritudo} y ARH_{Htrit>10} presentan diferencias significativas con ARH_{Hlosa} y ARH_{HS}, las cuales provienen todas del hormigón de la planta de prefabricado de losas Spiroll; las dos primeras son producto de hormigón suelto

mientras que la tercera muestra es de las losas Spiroll compactadas y curadas que permite una interfase entre el árido y la pasta de mortero más fuerte; la cuarta muestra aunque de hormigón suelto igualmente, no estuvo sometida a trituración lo que propicia una mayor cantidad de mortero adherido a su superficie. De lo planteado anteriormente se puede decir que el proceso tecnológico de los elementos y la trituración influyen en el peso específico de los ARH. Todos los pesos específicos se encuentran en el entorno de 2,12-2,48g/cm³.

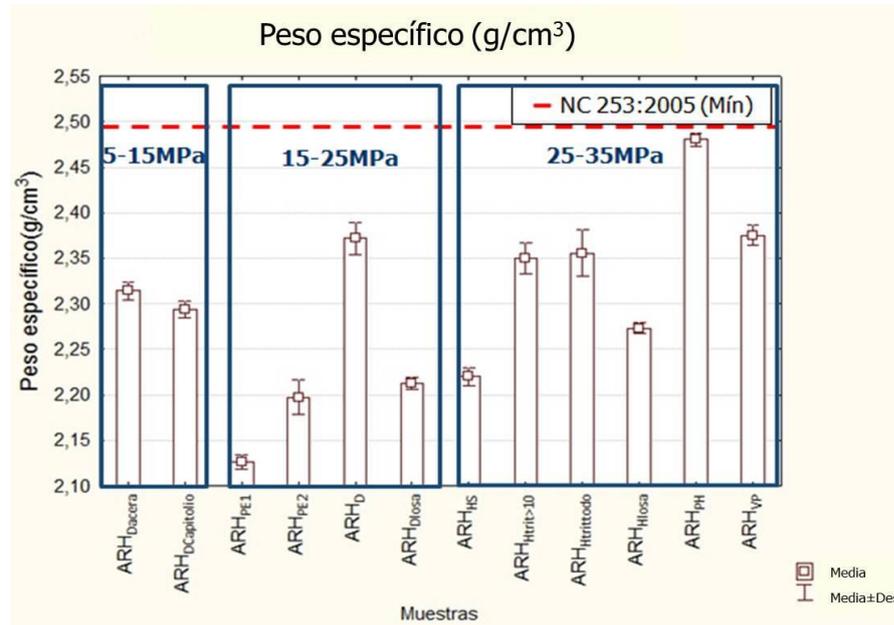


Figura 9. Peso específico de las muestras de ARH analizadas en la fracción gruesa.

✓ Absorción

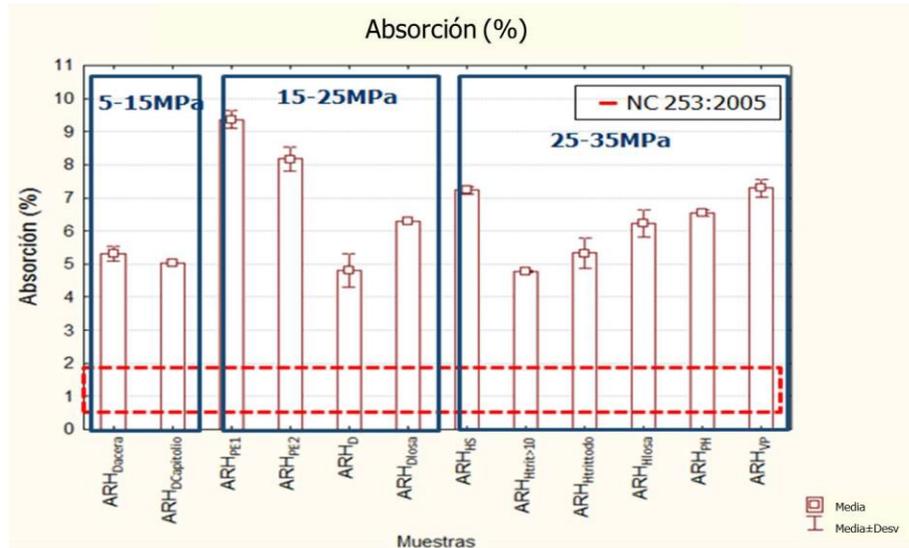


Figura 10. Porcentaje de absorción de las muestras de ARH analizadas en la fracción gruesa.

En la figura 10 se puede observar que todas las muestras de ARH tienen un porcentaje de absorción mayor que el especificado en la NC 253: 2005 [35] al igual que sucede en los áridos finos ya que esta propiedad como se dijo anteriormente está directamente relacionada con el contenido de mortero adherido. Como mismo sucedió en el peso específico existen diferencias significativas en el porcentaje de absorción entre muestras que pertenecen a un mismo grupo de resistencia del hormigón original y entre muestras del mismo material de origen, pero con diferentes procesos tecnológicos y de trituración, así como no existen diferencias significativas entre muestras de grupos diferentes. El porcentaje de absorción se encuentra en el entorno de 4,5-9,5%.

- ✓ Partículas planas y alargadas

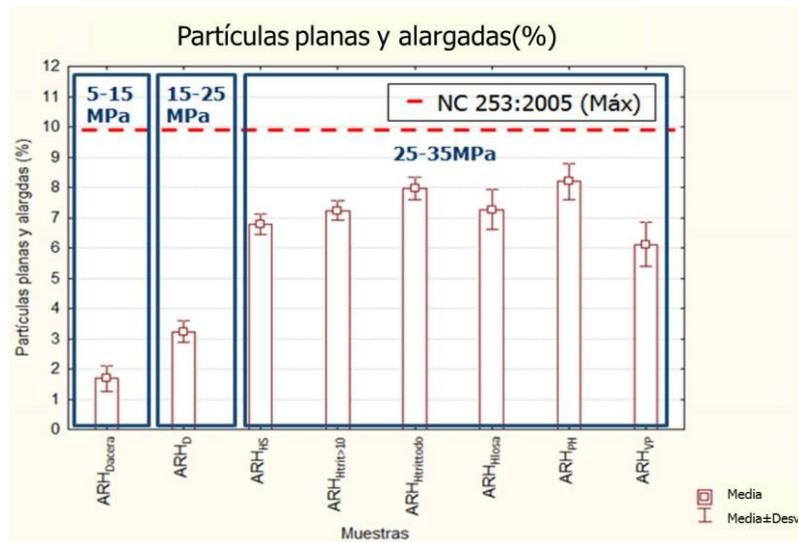


Figura 11. Partículas planas y alargadas de las muestras de ARH analizadas en la fracción gruesa.

Se observa en la figura 11 que todas las muestras de ARH se encuentran dentro del límite especificado en la NC 253: 2005 [35], esto se debe a que las mismas fueron trituradas y tamizadas lo cual reduce el número de partículas planas y alargadas. Se pueden apreciar además las medias y desviación estándar de los valores de cada muestra, de lo que se infiere que no existen diferencias significativas entre muestras con distintos tipos de trituración: ARH_{PH} con martillo o impacto, ARH_{Htritodo} y ARH_{Hlosa} con mandíbulas, por el contrario muestras trituradas de igual manera presentan diferencias significativas: ARH_{Dacera}, ARH_D, ARH_{Hlosa}. A partir de los resultados, puede decirse que tanto el tipo de trituración como el material de origen influyen en el porcentaje de partículas planas y alargadas de los ARH que se encuentra en el entorno de 1,5-9%.

- ✓ Coeficiente de los Ángeles

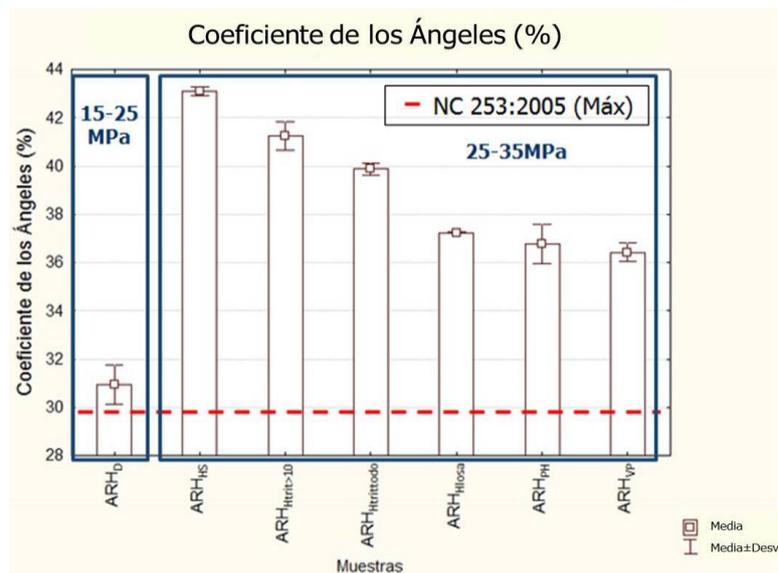


Figura 12. Coeficiente de los Ángeles de las muestras de ARH analizadas en la fracción gruesa.

En la figura 12 se puede observar que todas las muestras de ARH tienen un porcentaje de coeficiente de Los Ángeles (LA) mayor que lo especificado en la NC 253: 2005 [35], lo cual se debe principalmente a que durante la realización del ensayo el mortero presente en el ARH se fragmenta fácilmente. Por tanto, a medida que aumenta el contenido de mortero desprendido también aumenta el coeficiente de LA. Pueden observarse además los valores medios y desviación estándar de cada muestra, de lo que se deduce que existe una diferencia significativa entre los grupos de muestras de distintas resistencias, donde para una menor

resistencia el desgaste es menor, lo que se atribuye a que para lograr menores resistencias se necesita una menor cantidad de cemento y por tanto la cantidad de mortero adherido al AHR también tiende a ser menor. Por otro lado se aprecia que dentro de un mismo grupo de resistencia del hormigón original existen también diferencias significativas entre las muestras pero en menor grado, poniéndose aquí de manifiesto nuevamente el papel que juega el tipo de trituración y el proceso tecnológico que presenta el elemento. Las muestras ARH_{HS}, ARH_{Htritado} y ARH_{Htrito>10} a pesar de provenir de un mismo material presentan diferencias entre ellas, pues la primera no estuvo sometida a trituración propiciandando una mayor cantidad de mortero adherida a la superficie del árido y por tanto un mayor desgaste en comparación con las restantes; así mismo estas tres muestras presentan diferencias con ARH_{Hloosa} la cual aunque procede de la misma fuente estuvo sometida a un proceso de compactación y curado lo que confiere una interfase entre el árido y el mortero más fuerte, permitiendo un menor desgaste del árido. Una vez más se demuestra la influencia que tienen factores como las características del hormigón original, el proceso tecnológico y la trituración en las propiedades de los ARH.

4- CONCLUSIONES

De los ensayos realizados a las fracciones de áridos reciclados en esta investigación se obtuvo que los pesos específicos, porcentajes de absorción, material más fino que el tamiz 200 y desgaste de los ARH no cumplen con las especificaciones de las normas para AN para ser empleados en mezclas asfálticas en caliente. Las muestras de áridos finos reciclados presentan respecto a los áridos naturales: menor peso específico con valores entre 2,15 - 2,4g/cm³; mayor porcentaje de absorción con valores entre 6,2 - 10,6%; menor porcentaje de material más fino que el tamiz 200 con valores entre 53,5 - 10,0% y mayor porcentaje de equivalente de arena con valores entre 78 - 97%. De la misma manera las muestras de árido grueso reciclado respecto a los áridos naturales presentan: menor peso específico con valores entre 2,10 - 2,50g/cm³; mayor absorción con valores entre 4,0 - 11,0%; mayor porcentaje de partículas planas y alargadas con valores entre 1,5 - 9,0% y menor resistencia a la abrasión con valores entre 32 - 44%. Además se evidenció que el tipo de trituración de los residuos para la obtención de las fracciones de áridos reciclados, las características del hormigón de origen de los ARH, así como el proceso tecnológico de su fabricación influyen en las propiedades de los mismos.

5- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. A. P. Bistos, L. G. F. Purnarejo, E. H. S. Cotte, and H. A. R. Quintana, "Residuos de Construcción y Demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión.," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 35, 2017.
- [2] C. M. Martínez, M. F. ñ. Rojas, and M. I. S. d. R. Gómez, "Valorización de los residuos de construcción y demolición (RCD) como puzolanas en la fabricación de cementos eco-eficientes," *Monografías*, vol. 427, 2018.
- [3] S. Suárez-Silgado, J. D. A. Molina, L. Mahecha, and L. Calderón, "Diagnóstico y propuestas para la gestión de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Ibagué (Colombia)." *Gestión y Ambiente*, 2018.
- [4] J. R. Jiménez, F. Agrela, J. Ayuso, and M. López., "Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-base de carreteras," *Materiales de construcción*, 2011.
- [5] W. Sas, J. Dziecioł, and A. Głuchowski, "Estimation of Recycled Concrete Aggregate's Water Permeability Coefficient as Earth Construction Material with the Application of an Analytical Method," *Materials*, vol. 12, p. 2920, 2019.
- [6] E. A. Adeyanju, B. Ayobami, and A. Emmanuel, "Pavement interlayer material improvement using industrial waste: Review of literature," *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, vol. 9, pp. 1114-1122, 2018.
- [7] N. Gupta, M. Kluge, P. A. Chadik, and T. G. Townsend, "Recycled concrete aggregate as road base: Leaching constituents and neutralization by solid interactions and dilution," *Waste Management*, vol. 72, pp. 354-361, 2018.
- [8] M. Saberian, J. Li, B. Nguyen, and G. Wang, "Permanente deformation behaviour of pavement base and subbase containing recycled concrete aggregate, coarse and fine crumb rubber," *Construction and Building Materials*, vol. 178, pp. 51-58, 2018.
- [9] M. d. L. G. Garrido, "Estudio de los resultados en obra y a largo plazo de la utilización de residuos de construcción y demolición (RCD) en firmes de carreteras y urbanizaciones.," Tesis doctoral, Departamento de Construcciones arquitectónicas I, Universidad de Sevilla, 2015.

- [10] C. Pellegrino and F. Faleschini, "Sustainability and the Concrete Industry," 2016.
- [11] C. Alexandridou, G. N. Angelopoulos, and F. A. Coutelieris, "Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants.," *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 745-757, 2018.
- [12] M. A. Sarah and G. D. R. N. Ransinchung, "Strength and permeation characteristics of cement mortar with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 167, pp. 700-706, 2018.
- [13] J. Pizoón, J. Gołaszewski, M. Alwaeli, and P. S. 1, "Properties of Concrete with Recycled Concrete Aggregate Containing Metallurgical Sludge Waste," *Materials*, vol. 13, 2020.
- [14] I. Reyes, D. Acosta, A. Alonso, and J. Morales, "Propiedades de los áridos reciclados para mezclas asfálticas en caliente," *Revista Ciencia y Construcción.*, 2019.
- [15] D. Acosta, A. Alonso, and A. J. Tenza, "Laboratory evaluation of hot asphalt concrete properties with cuban recycled concrete aggregates," *Sustainability*, vol. 10, 2018.
- [16] 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.
- [17] D. Acosta, G. Kindelán, R. Moll, and A. Alonso, "Evaluación de la sensibilidad al agua de mezclas asfálticas en caliente con Residuos de Construcción y Demolición (RCD)," presented at the XII Conferencia Científico.Técnica de la Construcción, La Habana, Cuba, 2018.
- [18] M. S. Eisa, "Evaluation of hot mix asphalt made with recycled aggregates from demolition waste (RADW) coated with bitumen emulsion," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 3, 2018.
- [19] D. Topini, E. Toraldo, L. Andena, and E. Mariani, "Use of recycled fillers in bituminous mixtures for road pavements," *Construction and Building Materials*, vol. 159, pp. 18-197, 2018.
- [20] D. Acosta, A. Alonso, A. 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] S. W.M, Y. J, and S. H, "Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: a review.," *ACT*, vol. 17, pp. 151-167, 2019.
- [25] F. Colangelo, A. Petrillo, R. Cioffi, C. Borrelli, and A. Forcina, "Life cycle assessment of recycled concrete: A case study in southern Italy," *Science of the Total Environment*, vol. 615, pp. 1506-1517, 2018.
- [26] F. Colangelo and R. Cioffi, "Mechanical properties and durability of mortar containing fine fraction of demolition wastes produced by selective demolition in South Italy.," *Composites Part B*, vol. 115, pp. 43-50, 2017.
- [27] P. Figueiredo, C. Ulsen, M. Bergerman, and G. Mucsi, "Properties of recycled concrete aggregate produced by different comminution methods," presented at the Waste XXI Recycling, 2018.
- [28] F. Ozalp, H. D. Yilmaz, M. Kara, O. Kaya, and A. Sahin, "Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes," *Construction and Building Materials*, vol. 110, pp. 17-23, 2016.
- [29] Varios, "Catálogo de firmas y unidades de obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)," U. d. Córdoba, Ed., ed. Agencia de oBras Públicas de la Junta de Andalucía. Consejería de Fomento y Vivienda. Junta de Andalucía: UCOPress. Eitorial Universidad de Córdoba, 2016.
- [30] 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.
- [31] T. C. Cardoza, "Influencia de la fracción gruesa y muy fina de áridos reciclados mixtos en las propiedades del hormigón," PhD, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, 2016.
- [32] M. S. de Juan and P. A. Gutiérrez, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 872-877, 2// 2009.

- [33] M. Chen, J. Lin, and S. Wu, "Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 3901-3914, 2011.
- [34] G. F. F. Chavez, "Aprovechamiento de hormigón reciclado en obras viales," Máster tesis de maestría, Departamento de Construcciones, Universidad Nacional de La Plata, 2012.
- [35] *NC 253 Carreteras. Materiales bituminosos. Hormigón asfáltico caliente. Especificaciones*, O. N. d. Normalización, 2005.
- [36] *NC 178 Áridos. Análisis granulométrico*, O. N. d. Normalización, 2002.
- [37] *NC 186 Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo* O. N. d. Normalización, 2002.
- [38] *NC 182 Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (no. 200). Método de ensayo*, O. N. d. Normalización, 2002.
- [39] *NC 886 Áridos. Evaluación de finos. Ensayo del equivalente de arena.*, O. N. d. Normalización, 2012.
- [40] *NC 189 Áridos gruesos. detreminación de partículas planas y alargadas. Método de ensayo*, O. N. d. Normalización, 2002.
- [41] *NC 188 Áridos gruesos. Abrasión. Método de ensayo*, O. N. d. Normalización, 2002.
- [42] S. Paranavithana and A. Mohajerani, "Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 48, pp. 1-12, 2006.
- [43] Y. Cho, T. Yun, I. T. Kim, and N. R. Choy, "The Application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for Hot Mix Asphalt (HMA) base Layer Aggregate.," *KSCE Journal of Civil Engineering* vol. 15, pp. 473-478, 2011.