

Peña Muñoz, Sebastián, Terán Puerta, Juan Ferney, Molina Sánchez, Jhony Andrés, Cañola, Hernán Darío, Builes-Jaramillo, Alejandro and Zuluaga, Jesús Ubany. (2018). Evaluación de las propiedades de residuos de construcción y demolición de concreto para su uso en la elaboración de sub-bases granulares. Una alternativa al manejo de residuos en el Valle de Aburrá. Cuaderno Activa, 10(1), 79 - 90.



Evaluación de las propiedades de residuos de construcción y demolición de concreto para su uso en la elaboración de sub-bases granulares. Una alternativa al manejo de residuos en el Valle de Aburrá. □

Assessment of the properties of construction waste and demolition of concrete for the construction of granular sub-bases. An alternative for waste management in the Valle de Aburrá

Sebastián Peña Muñoz*, Juan Ferney Terán Puerta†, Jhony Andrés Molina Sánchez‡; Hernán Darío Cañola§; Alejandro Builes-Jaramillo°; Jesús Ubany Zuluaga△

Recibido: 28/12/2017 Aprobado: 21/02/2018

Resumen: En este artículo se evalúa el uso de residuos de construcción y demolición (RCD) de concreto obtenidos en obras de construcción de la ciudad de Medellín como materia prima para la elaboración de bases y sub-bases granulares, como alternativa para la reducción de la problemática ambiental asociada a los residuos de demolición. La caracterización de parámetros físico - mecánicos se obtuvo por medio de ensayos de laboratorio basados en la normatividad del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS), aplicando las normas descritas en el artículo 300-13, 320-13 y 330-13, con el fin de lograr unos resultados acordes con la reglamentación colombiana. Con base en los

resultados obtenidos se encontró que la muestra de base y sub-base granular fabricada con este tipo de residuos tiene un comportamiento similar y en algunos casos mejor que los obtenidos con áridos naturales, arrojando una densidad de 96,2% mediante compactación manual.

Palabras clave: Concreto, Residuos de demolición, Granulares, Residuos, Sub-bases.

Abstract: This article proposes the use of construction and demolition waste (RCDW) of concrete in the city of Medellín as material for the elaboration of granular bases and sub-bases, in

□ Artículo resultado de investigación

* Constructor Civil. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín – Antioquia. Sebastianpena_25@hotmail.com

† Constructor Civil. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín – Antioquia. Ferjuan095@gmail.com

‡ Constructor Civil Institución. Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín – Antioquia. Jhony_sanchez_@hotmail.com

§ Magíster en Construcción. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín – Antioquia. hernan.canola@colmayor.edu.co

° Doctor en Ingeniería Recursos Hidráulicos. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín – Antioquia. luis.builes@colmayor.edu.co

△ Administrador de Obras. Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín – Antioquia. luis.builes@colmayor.edu.co

order to tackle the environmental issues related to the demolition waste. The characterization of physical and mechanical parameters was obtained by means of laboratory techniques based on the regulations of the National Institute of Roads (INVÍAS) applying the standards described in the article 300-13, 320-13 and 330-13 in order to achieve results in accordance with the Colombian regulations. On the basis of the results obtained it was found that the sample base and sub-base granular manufactured with this type of waste has a similar behavior and in some cases better than those made with aggregates natural throwing a density of 96.2% through manual compaction.

Keywords: Concrete, Demolition waste, Granulars, Residues, Sub-base.

Introducción

La construcción es uno de los sectores más contaminantes a nivel mundial debido a la masiva producción de residuos de construcción y demolición (RCD), generados durante los procesos de demolición de edificaciones que han cumplido con su vida útil o durante los procesos de ejecución de nuevas obras (Méndez et al, 2010).

Se consideran RCD, aquellos que se generan en el entorno urbano provenientes del sector de la edificación, ya que su composición es cuantitativa y cualitativamente distinta de la generada por los residuos sólidos de manejo común (Bustos et al, 2017); Se trata de residuos constituidos por diferentes materiales como: desechos de concreto, mortero, acero, materiales cerámicos, materiales poliméricos y madera, los cuales han sido generados durante la ejecución de viviendas nuevas, reformas o demolición de edificaciones.

Rodríguez y otros (2006) realizaron un estudio sobre la influencia de la inclusión de desechos de PVC sobre el CBR de un material granular tipo sub-base y determinaron que las mezclas realizadas con un porcentaje de adición de desecho de PVC de 3% presenta un aumento de resistencia al esfuerzo cortante del suelo de 18% y una reducción del peso unitario del 2.5% en comparación con porcentajes mayores de adición, como las adiciones del 5%, lo que podría indicar que este es un porcentaje

ideal para su uso en la ejecución de sub-bases granulares. Muchas investigaciones en pro del cuidado ambiental y de la reducción de costos en obras, han demostrado que el uso de los residuos de demolición como el concreto generan impactos positivos debido a su implementación como material alternativo de construcción, tal es el caso de las bases y sub-bases granulares destinadas al soporte de pavimentos, mediante procesos de compactación que garantizan un incremento de su densidad y, por ende, una mejora de sus propiedades mecánicas; además, la reutilización del concreto reciclado en obras de construcción contribuye a la reducción de desechos llevados a botaderos los cuales en la actualidad se han considerado como un problema ambiental a nivel mundial (Xuan et al, 2015; Woolley, 1994; Arshad & Ahmed, 2017; Abu & Behiry, 2013; Arulrajah et al, 2014).

En los países en vía de desarrollo se desechan materiales que tienen un valor económico importante y, por otro lado, la falta de sistematización en el tratamiento de esos residuos genera impactos ambientales negativos debido a la falta de implementación de procesos de reutilización y también un incremento en el consumo energético nacional a causa de la producción masiva de nuevos materiales y explotación de recursos naturales (Sáez et al, 2014). En América la reutilización de los RCD es muy baja, solo algunos países como Brasil, México y Estados Unidos están utilizando productos del reciclaje de los RCD, aprovechándolos para la elaboración de bases o sub-bases granulares, y estos solo llegan a un 10% del aprovechamiento total de estos residuos como agregados en la construcción de las bases de soporte de los pavimentos flexibles y rígidos (Gómez & Farias, 2012; Conceição et al. (2010); Hernández, 2008; Castaño et al 2013; Robayo et al, 2013).

Actualmente se cuenta con normas para la regulación de la producción y gestión de RCD en Colombia (Secretaría de Ambiente, 2011-Ministerio del Medio Ambiente, 1994) con el fin de garantizar la mejora ambiental en las ciudades. La finalidad específica de esas normas implica la reducción de la producción de los RCD, la reutilización de

aquellos residuos o elementos que así lo permitan, la valorización energética de los residuos que no puedan reciclarse y el depósito adecuado de estos residuos en vertederos oficiales (Castaño et al, 2013).

En general, los residuos producidos en la construcción de obras están conformados en una cantidad considerable de escombros de mampostería y concreto (Rodríguez, 2008); los cuales pueden ser separados mediante un sistema de reciclaje selectivo, en el sitio o en la fábrica de reciclaje. Hasta ahora esos dos componentes de construcción y demolición han sido exitosamente reutilizados en la elaboración de concreto no estructural, construcción de estructuras viales y vías en pavimento rígido y flexible (Xuan et al, 2010). Las propiedades de los agregados reciclados del concreto están influenciadas por las propiedades de los materiales del concreto y de su proceso de ejecución (Ihobe S.A., 2011-Taherkhani, 2015).

El árido reciclado al igual que el árido natural o el artificial son materiales utilizados en la construcción de mampuestos, morteros y concretos no estructurales, sin embargo los áridos reciclados son muy heterogéneos y no tienen una matriz fija por lo tanto sus propiedades mecánicas son muy variables en comparación a las propiedades de los áridos naturales. Las características básicas que

definen al material serán las mismas que se utilizan para los áridos naturales con algunas diferencias propias de su naturaleza, como la heterogeneidad de sus componentes (Ihobe S.A., 2011).

Particularmente en Medellín la falta de sitios adecuados para la disposición final de residuos de construcción y demolición, originados por la gran demanda de edificaciones nuevas en la ciudad, hacen necesaria la evaluación de alternativas para la reutilización de dichos residuos. La producción de estos residuos de construcción y demolición han ido en notable aumento debido al gran crecimiento de la industria de la construcción en los últimos años (Castaño et al, 2013). En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) se arrojan en promedio 2'600.000 toneladas anuales de escombros, de los cuales más de un millón de toneladas se disponen en escombreras ilegales o lugares clandestinos, además se estima que por cada metro cuadrado construido se generan 1,35 m³ de residuos de construcción, de los cuales entre el 50 y el 70 % se pueden reciclar, y en un elevado porcentaje, comercializar (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015). Con relación a producción de RCD, específicamente concreto y mortero, en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se presenta la siguiente distribución anual en cuanto al sector de generación (ver tabla 1).

Tabla 1. Distribución anual de Concreto y sus derivados como RCD en el Valle de Aburrá

| Sector | Generación anual de RCD (Hormigón mortero, bloques de concreto) | Un |
|-------------------------|---|-----|
| Construcción nueva | 545.856 | m3 |
| | 736.906 | Ton |
| Reformas y adecuaciones | 40.238 | m3 |
| | 64.380 | Ton |
| Obras públicas | 27.209 | m3 |
| | 36.732 | Ton |
| Total m3 | 613.303 | m3 |
| Total Ton | 838.018 | Ton |

Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015)

Adicional a esto, existe una política clara basada en el Decreto 1609 de 2013, en el que se regula, controla y castiga a quienes de una forma indiscriminada llevan este tipo de desechos de forma ilegal a sitios no autorizados como terrenos abandonados, zonas verdes e incluso vertientes hídricas, lo que le ha provocado un daño grande al ambiente (Ministerio de Medio Ambiente, 2009-Ministerio del Medio Ambiente, 1994).

En el presente trabajo se busca contribuir a la reducción de RCD como alternativa a la mejora ambiental del valle de Aburrá, mediante la utilización de RCD de concreto como materia prima para la elaboración de bases y sub-bases, destinadas al remplazo parcial de la estructura de soportes de pavimentos (INVÍAS, 2012). Se realizaron ensayos de laboratorio de forma controlada para determinar las propiedades físico-mecánicas de los RCD de concreto a partir de la norma INVÍAS para la disposición general en la ejecución de afirmados, sub-bases granulares y bases granulares y estabilización, artículos 300, 320 y 330 (INVÍAS, 2012-INVÍAS, 2007) y así evaluar su potencial uso como bases en la construcción de vías.

El artículo se compone de una sección metodológica en la que se describen los ensayos de laboratorio para evaluar la capacidad de los RCD, una sección de resultados en los que se presentan en forma de cifras y gráficos los principales resultados encontrados con su

Tabla 2. Ensayos realizados a RCD como material granular

| Ensayo | Norma |
|--|----------------|
| Limite plástico e índice de plasticidad con el cual se determina la humedad límite entre el estado sólido y el plástico del material analizado (INVÍAS, 2012). | I.N.V. E – 126 |
| Contenido de materia orgánica (INVÍAS, 2012). | I.N.V. E – 121 |
| Desgaste de los ángeles (INVÍAS, 2012). | I.N.V. E – 218 |
| Equivalente de arena (INVÍAS-133, 2013). | I.N.V. E – 133 |
| Pesos por unidad de volumen (INVÍAS, 2012). | I.N.V. E – 217 |
| Absorción y porosidad (INVÍAS, 2012). | I.N.V. E – 222 |
| Compactación de la base y Proctor estándar y modificado (INVÍAS, 2012). | I.N.V. E – 142 |

Fuente: Autores

respectiva discusión y, finalmente, se presenta una sección de conclusiones.

Metodología

Análisis experimental.

El proceso experimental inicia con la recolección de residuos de construcción y demolición de concreto para ser empleados como alternativa en la elaboración de bases y sub-bases granulares (Cement Concrete & Agregates Australia, 2008). Para el caso particular de este proyecto se realizó un proceso de muestreo aleatorio de material RCD de concreto con las características necesarias de tamaño y composición (sin cerámicos ni acero de refuerzo), necesarios para poder ser triturados, y estos provenientes de la obra Unidad de Vida Articulada (UVA) El Paraíso ubicada en el corregimiento de San Antonio de Prado en la ciudad de Medellín, para el análisis de granulometría se recolectaron dos muestras de 400 gramos. Esta cantidad es suficiente para seguir los requerimientos en cuanto a análisis granulométricos ASTM D 422 (ASTM, 2007) y análisis propuestos por la normatividad colombiana de pavimentos para verificar si las muestras recolectadas son aptas para la construcción de bases y sub-bases granulares.

Análisis normativos.

Una vez ejecutado el análisis de granulometría se realizan los análisis establecidos en la normatividad colombiana, como se muestra en la tabla 2.

Resultados

Al evaluar los resultados obtenidos del ensayo de granulometría se pudo determinar que el concreto triturado proveniente de RCD posee un alto porcentaje de material grueso granular (Gómez & Farias, 2012), sobrepasando el límite superior establecido en la norma INVÍAS 320 (INVÍAS, 2012) para ser utilizado como sub-base granular tipo

1. Para los tamices con apertura de espacios de malla de 37,5mm y 25mm (ver tabla 3-4), también se observó que dicho material tiene una buena gradación para ser utilizada para sub-base granular tipo 2, aunque posee un leve porcentaje superior de material grueso granular en el tamiz de 25mm, lo cual sobrepasa lo establecido en la norma INVÍAS 320 para dicho tamiz.

Tabla 3. Granulometría para sub-base granular con material RCD

| Apertura de espacios de malla tamiz (mm) | Peso retenido (gr) | Porcentaje retenido (%) | Porcentaje retenido acumulado (%) | Porcentaje que pasa (%) |
|--|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 50.8 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 37.5 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 25 | 16 | 4.02 | 4.02 | 95.98 |
| 12.5 | 106 | 26.63 | 30.65 | 69.35 |
| 9.5 | 20 | 5.03 | 35.68 | 64.32 |
| 4.75 | 52 | 13.07 | 48.74 | 51.26 |
| 2 | 60 | 15.08 | 63.82 | 36.18 |
| 0.425 | 72 | 18.09 | 81.91 | 18.09 |
| 0.075 | 54 | 13.57 | 95.48 | 4.52 |
| Fondo | 18 | 4.52 | 100.00 | 0.00 |
| <i>Fuente: Autores</i> | 398 | 100.00 | | |

Tabla 4. Granulometría para base granular con material RCD

| Apertura de espacios de malla tamiz (mm) | Peso retenido (gr) | Porcentaje retenido (%) | Porcentaje retenido acumulado (%) | Porcentaje que pasa (%) |
|--|--------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 25.4 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 19.1 | 58 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 9.52 | 100 | 14.50 | 14.50 | 85.50 |
| 4.75 | 72 | 25.00 | 39.50 | 60.50 |
| 2 | 62 | 18.00 | 57.50 | 42.50 |
| 0.72 | 60 | 15.50 | 73.00 | 27.00 |
| 0.074 | 38 | 15.00 | 88.00 | 12.00 |
| Fondo | 10 | 9.50 | 97.50 | 2.50 |
| Fuente: Autores | 400.00 | 2.50 | 100.00 | 0.00 |
| | | 100.00 | | |

En el material analizado para sub-bases granulares se observó que el mayor peso del material grueso granular quedó retenido en el tamiz de 12.7mm de apertura de espacios de malla y en el caso del agregado granular el mayor peso quedó retenido en el tamiz de 0.72mm de apertura de espacios de malla.

Se observó que el concreto triturado proveniente de RCD posee un alto porcentaje de material granular y además sobrepasa el porcentaje de material granular permitido por la norma INVÍAS 330 para el límite inferior en el tamiz de 0.075mm de apertura de espacios de malla para base granular tipo 1 y base granular tipo 2 (Pavón et al, 2011).

En el material analizado para bases granulares se observó que el mayor peso del material grueso granular, quedó retenido en el tamiz de 9.52mm de apertura de espacios de malla y en el caso del agregado granular el mayor peso quedó retenido en el tamiz de apertura de espacios de malla de 4.75mm. La curva granulométrica es continua, bien gradada y se encuentra en el nivel intermedio de los límites superior e inferior como se muestra en la Fig. 1 y Fig. 2. El tamaño máximo para la sub-base granular tipo 1 fue de aproximadamente

80mm con un coeficiente de uniformidad $C_u = 30$ y un coeficiente de $C_c = 1.4$ (Fig. 1) y para la base granular el tamaño máximo fue de 60 mm con $C_u = 25$ y $C_c = 3$ (Fig. 2). Los resultados anteriores confirman la adecuada gradación del material.

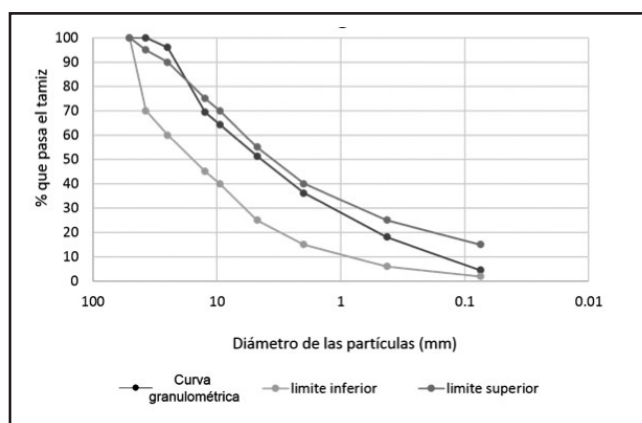


Figura 1. Curva granulométrica para sub-base granular tipo 1 (sbg-1). Fuente: Autores

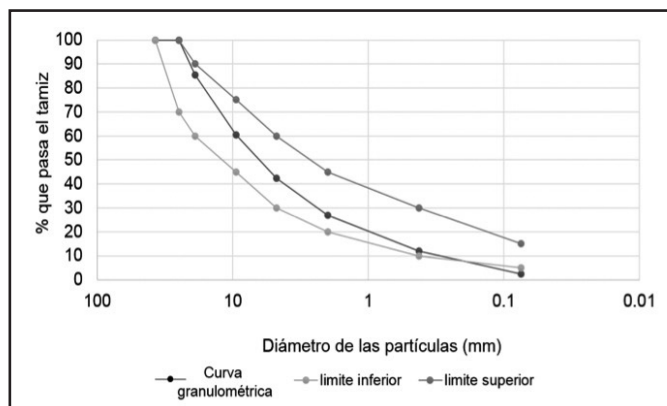


Figura 2. Curva granulométrica para base granular tipo 1 (bg-1). Fuente: Autores

Posterior a los análisis realizados con antelación se toma una muestra de 5000 gr de concreto reciclado como RCD y se somete a la prueba de desgaste

de acuerdo con los parámetros establecidos en la norma INVÍAS E-218 (INVÍAS, 2012); los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de prueba de desgaste de material RCD

| Material granular | Porcentaje de desgaste en la máquina de los Ángeles (%) | Norma INVÍAS E-218 porcentaje máximo de desgaste para agregados de sub-base granular y afirmado (%) | Cumple |
|-------------------|---|---|--------|
| Sub-base Granular | 40.1% | 50% | Si |
| Base Granular | 40.1% | 40% | Si |

Se realizaron ensayos de contenido de materia orgánica (INVÍAS, 2012), con un resultado de 0,03% y equivalente de arena del 61%. Luego de los análisis realizados se procedió a ejecutar el

ensayo de Proctor modificado para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de la muestra compactada (INVÍAS, 2012), arrojando los siguientes resultados, ver tablas 6 y 7 y figuras 3-4.

Tabla 6. Resultados Proctor modificado de material RCD

| | |
|--|-------|
| Máxima densidad seca (gr/cm ³) | 1.818 |
| Óptimo contenido humedad (%) | 11.5 |

Tabla 7. Resultados Proctor modificado de material pétreo

| | |
|---|-------|
| Masa unitaria seca máxima (gr/cm ³) | 2.315 |
| Porcentaje de humedad óptima (%) | 8.0 |

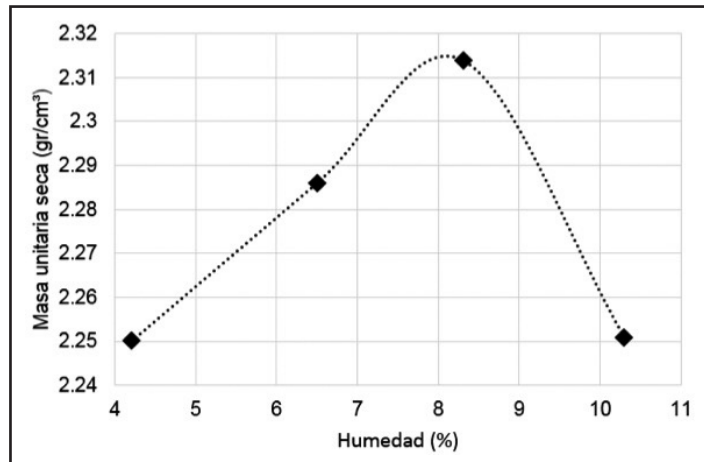


Figura 3. Proctor modificado de material pétreo
Fuente: Autores

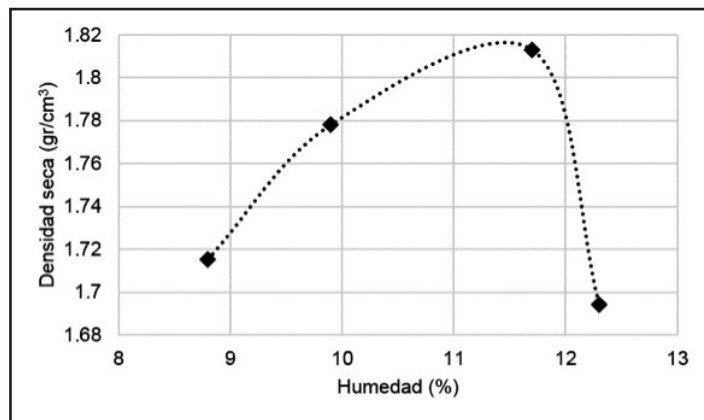


Figura 4. Proctor modificado de material RCD
Fuente: Autores

Tras observar los resultados se pudo determinar que los agregados obtenidos de los RCD de concreto tienen menor densidad y necesitan mayor cantidad de agua para obtener una buena compactación, esto debido a la cantidad de partículas cementantes adheridas a los materiales pétreos y a la composición misma del concreto donde fueron obtenidos (Conceição et al, 2010).

Se tomaron los límites granulométricos establecidos en la norma INVÍAS en los artículos 320 y 330 para la base granular tipo 1 y sub-base granular tipo 1, para luego realizar un promedio del material granular que pasa por cada tamiz y así poder establecer el peso de material requerido para fabricar una muestra de base y sub-base granular de 10 000 gramos, ver tablas 7 y 8.

Tabla 7. Pesos correspondientes a la granulometría de la sbg-1 del material RCD

| Granulometría Sub-base granular tipo 1 | | | | |
|---|---------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|
| Apertura de espacios de malla tamiz (mm) | Peso retenido (gr) | Porcentaje retenido (%) | Porcentaje retenido acumulado (%) | Porcentaje que pasa (%) |
| 50.8 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100 |
| 37.5 | 1750 | 17.50 | 17.50 | 82.5 |
| 25 | 750 | 7.50 | 25.00 | 75 |
| 12.5 | 1500 | 15.00 | 40.00 | 60 |
| 9.5 | 500 | 5.00 | 45.00 | 55 |
| 4.75 | 1500 | 15.00 | 60.00 | 40 |
| 2 | 1250 | 12.50 | 72.50 | 27.5 |
| 0.425 | 1200 | 12.00 | 84.50 | 15.5 |
| 0.075 | 700 | 7.00 | 91.50 | 8.5 |
| Fondo | 850 | 8.50 | 100.00 | 0.00 |
| Total | 10000 | 100 | | |

Fuente: Autores

Tabla 8. Pesos correspondientes a la granulometría de la bg-1 del material RCD

| Granulometría Base granular tipo 2 | | | | |
|---|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Apertura de espacios de malla tamiz (mm) | Peso retenido (gr) | Porcentaje retenido | Porcentaje retenido acumulado | Porcentaje que pasa |
| 37.5 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100 |
| 25 | 1500 | 15.00 | 15.00 | 85 |
| 19 | 1000 | 10.00 | 25.00 | 75 |
| 9.5 | 1500 | 15.00 | 40.00 | 60 |
| 4.75 | 1500 | 15.00 | 55.00 | 45 |
| 2 | 1250 | 12.50 | 67.50 | 32.5 |
| 0.425 | 1250 | 12.50 | 80.00 | 20 |
| 0.075 | 1000 | 10.00 | 90.00 | 10 |
| Fondo | 1000 | 10.00 | 100.00 | 0.00 |
| Total | 10000 | 100 | | |

Fuente: Autores

Se homogeneizó el material agregando la cantidad de agua correspondiente a los resultados obtenidos en el ensayo de Proctor modificado con relación al porcentaje de humedad óptima para material RCD (ver tabla 6), lo anterior a través de un proceso de compactación manual vertiendo el material en un molde de 50x50x10cm. Una vez realizada la compactación se procedió a realizar el ensayo de densidad o masa unitaria del suelo mediante el cono de arena obteniendo un resultado del 96.2%. De acuerdo con este resultado, el valor obtenido en el proceso de compactación de la muestra del material granular estructural elaborado a partir de RCD no cumple para el valor mínimo exigido para bases granulares clasificadas, valor que está establecido en porcentajes iguales o mayores al cien por ciento (INVÍAS, 2012).

Conclusiones

Tomando en cuenta las características de los materiales para el análisis de bases y sub-bases granulares, se establece lo siguiente:

Se concluye que el concreto triturado proveniente de RCD utilizado para el ensayo de granulometría presenta en general una buena gradación, aunque requiere de ciertos ajustes como es el proceso de separación de materiales cerámicos inmersos en los RCD de concreto para la elaboración de sub-bases granulares y bases granulares. Además, es importante resaltar que estos ensayos deben ser replicados siempre que se desee emplear RCD, ya que cada una de las dosificaciones del concreto puede variar, alterando de esta forma, la materia prima para la elaboración de las bases y sub-bases granulares.

Los RCD estudiados cumplen con los requisitos granulométricos establecidos en la norma INV-E-300 para agregados a utilizar en capas granulares estructurales como son las bases y sub-bases. Según los resultados obtenidos en esta investigación la mejor alternativa sería emplear los RCD para la elaboración de sub-bases granulares clasificadas según parámetros normativos INVÍAS cuyo valor mínimo exigido es $\geq 95\%$ de compactación.

Los resultados de densidad seca para RCD de concreto de 1,818 gr/cm³ y contenido de humedad

del 11,5% se obtienen bajo parámetros de la norma INVÍAS (INVÍAS, 2012) y presentan gran similitud con los resultados generados por otros investigadores como Abu & Behiry, (2013) que muestran resultados para densidad seca entre 1,740 gr/cm³ y 1,984 gr/cm³ y contenido de humedad entre 9,5% y 14,7%.

Con base en este resultado se puede considerar a los RCD como una alternativa para el uso racional y la optimización en el uso de materiales en la construcción de bases de soporte para pavimentos. Este tipo de alternativas constructivas pueden llegar a generar disminuciones en los costos de producción de pavimentos y la disminución de los costos de disposición de material.

El uso de RCD proveniente de concreto en la ejecución de bases y sub-bases granulares es una alternativa para la reducción de la problemática ambiental actual que se presenta en la ciudad de Medellín y en Colombia con relación a la producción de RCD, debido a que estos materiales se podrían utilizar en los procesos de mejora vial para los 162.000 kilómetros de vías que hacen parte de la red nacional vial que presenta Colombia (Pérez, 2005).

La reutilización de los RCD permite mejorar los indicadores de gestión ambiental en la industria de la construcción, al encontrarse una forma efectiva de reducir el almacenamiento en botaderos de escombros en la ciudad y reduciendo significativamente el impacto de la construcción. Como investigación futura se propone la comparación del costo económico de la solución propuesta respecto a otras alternativas de tipo tradicional. También es necesario estudiar el comportamiento a largo plazo de sub-bases y bases granulares a base de RCD.

Para continuar con la investigación en esta línea sería interesante producir industrialmente sub-bases y bases granulares a base de RCD para construir un tramo de vía y verificar los diferentes parámetros estudiados en la presente investigación. Adicionalmente, se podría validar el comportamiento de sub-bases y bases granulares a base de RCD con un modelo numérico que incluya también las propiedades del pavimento.

Referencias

- Abu, A. E., & Behiry, M. (2013). Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or sub-base layer in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 4, 661-673. Egipto.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), D 422. (2007). Standard test method for particle - Size analysis of soils. ASTM Annual book of standards, West Conshohocken, Pa.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2015). Política pública de construcción sostenible 1. Línea base (Vol. 1). Medellín, Antioquia, Colombia.
- Arshad, M., & Ahmed, M. F. (2017). Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/sub-base layers of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 151, 83-97.
- Arulrajah, A., Disfani, M., Horpibulsuk, S., Cherdasak, S., & Prongmanee, N. (2014). Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/sub-base applications. *Construction and Building Materials*, 58, 245-257.
- Bustos, P. C., Pumarejo, F. L., & Cotte, S. É. (25 de febrero de 2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 533-555.
- Castaño, J., Rodríguez, R., Lasso, L., Gómez, A., & Ocampo, M. (octubre-diciembre de 2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá perspectivas y limitantes. *Tecnura*, 17(38), 121-129.
- Cement Concrete & Agregates Australia. (Mayo de 2008). Use of Recycled Aggregates in construction. Australia: Cement Concrete & Agregates Australia.
- Gómez, A., & Farias, M. (2012). Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y demolición en la estructura de pavimento. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (págs. 0-8). Brasilia: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A.C.
- Conceição, L. F., Dos Santos, M. R., Vasconcelos, K., & Bernucci, L. (2010). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25, 2972-2979.
- Hernández, M. S. (2008). Diseño sustentable de materiales de construcción; caso del concreto de matriz de cemento Pórtland. *Ciencia Ergo Sum*, 306-310.
- Ihobe S.A. (2011). Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. País Vasco: Ihobe S.A.
- INVÍAS. (2012). Artículo 320. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. (2012). Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos-217. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. (2012). Determinación del contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición-121. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. (2012). Disposiciones generales para la ejecución de afirmados, sub-bases. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. (2012). Gravedad específica y absorción de agregados finos-222. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. (2012). Límite plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos-126. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.

- INVÍAS. (2012). Proctor modificado-142. Bogotá D.C: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. (2012). Relación de humedad – Masa unitaria Seca en los suelos. Bogotá D.C: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. (2012). Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 1/2") por medio de la máquina de los Ángeles-218. Bogotá D.C: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. (2012). Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. (2012). Disposiciones generales para la ejecución de afirmados, sub-bases granulares y bases granulares y estabilizadas. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS-133. (2012). Equivalente de arena de suelos y agregados finos. Bogotá D.C: Instituto Nacional de Vías.
- Méndez, N., Rodrigues, C., Cruz, N., & Laines, J. R. (2010). Los escombros como agregados en la industria de la construcción. KUXULKAB, XVI (30), 37-45.
- Ministerio de Medio Ambiente. (28 de agosto de 2009). Decreto 1609 de 2013. Por el cual se reglamenta el acuerdo municipal 062 de 2009 que establece una política pública para la gestión de escombros en la ciudad de Medellín. Medellín, Antioquia, Colombia: Alcaldía de Medellín.
- Ministerio del Medio Ambiente. (14 de diciembre de 1994). Resolución 541-1994. Bogotá D.C, Bogotá, Colombia: Fondo de vigilancia y seguridad de Bogotá en liquidación.
- Pavón, E., Etxeberria, M., & Martínez, I. (2011). Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones, activa e inerte. Revista de la Construcción, 10(3), 5-7.
- Pérez, G. J. (2005). La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia. Banco de la República de Colombia, Centro de estudios económicos y regionales, Cartagena.
- Robayo, S. R., Matthey, C. P., Silva, U. Y., Burgos, G. D., & Delvasto, A. S. (2013). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. *Tecnura*, 19 (44), 157-170.
- Rodríguez, A. L. (2008). Gestión de RCD y su repercusión en el desarrollo sostenible. *Residuos Revista Técnica* (18), 48-61.
- Rodríguez, R. E., Rondón, Q. A., Vélez, P. D., & Aguirre, A. L. (2006). Influencia de la inclusión de desechos de PVC sobre el CBR de un material granular tipo Sub-base. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 21-30.
- Sáez, A., Joheni, A., & Urdaneta, G. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia* (3), 121-135.
- Secretaría de Ambiente. (25 de abril de 2011). Resolución 2397 DE 2011. Resolución 2397 DE 2011. Bogotá, D.C, Cundinamarca, Colombia: Alcaldía de Bogotá.
- Taherkhani, H. (abril de 2015). Evaluation of the Physical Properties of Unbound Base Layer Containing Recycled Aggregates. *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(4), 279-285.
- Woolley, G. (1994). State of the art report use of waste materials in construction - technological development. *Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*.
- Xuan, D., Houben, L., & Shui, Z. (1 de Agosto de 2010). Cement treated recycled demolition waste as a road base material. *Journal of Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Ed.*, 25(4), 696-699.
- Xuan, D., Molenaar, A., & Houben, M. (2015). Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases. *Journal of Cleaner Production*, 100, 77-83.