



Evaluación del desempeño de mezclas de suelo y residuos de la construcción como una alternativa para el mejoramiento de subrasantes de vías de bajo volumen de tránsito*

Cesar Augusto Hidalgo Montoya**

Ana Milena Castrillon Rodriguez***

Received: 28/07/2022 • Accepted: 21/11/2022

<https://doi.org/10.22395/rium.v21n41a6>

Resumen

Aunque las vías rurales por lo general tienen gran importancia económica para las comunidades, se pueden considerar de bajo volumen de tránsito (BVT), lo cual lleva a que su pavimentación sea difícil de viabilizar financieramente. Por lo anterior, la mayoría de estas vías son no pavimentadas, generando dificultades para el tránsito, particularmente durante temporadas lluviosas. De otro lado, los residuos de construcción y demolición (RCD) constituyen un problema ambiental en las ciudades; se ha identificado su uso en la construcción de carreteras como una alternativa para su disposición final. Esta investigación tuvo como finalidad evaluar una alternativa para el uso en vías de bajo volumen de tránsito como material para el mejoramiento de subrasantes del pavimento. En específico, se evaluó el empleo de residuos procedentes de las construcciones o demoliciones de mampostería de ladrillo. Se realizó una evaluación tanto técnica como económica, para lo cual se realizaron diseños de pavimentos adicionando en proporciones determinadas entre 10 % y 40 % de RDCL y suelo residual, y se compararon con diseños de pavimentos convencionales usando materiales granulares de explotación de canteras. Para todos los diseños se usaron las mismas condiciones de tránsito, suelos de subrasante y metodologías de diseño. Los resultados obtenidos muestran que el uso de RCD_L mezclado con suelo como mejoramiento de la subrasante, se obtienen reducciones en espesores de capas granulares del pavimento que pueden permitir prescindir de la capa de subbase granular con los respectivos beneficios económicos y ambientales.

Palabras clave: residuos; demolición; ladrillo; mejoramiento; desempeño; subrasante.

* Artículo de investigación cuyos resultados forman parte del proyecto Optimización de materias primas y su uso en procesos de construcción, financiado por la Universidad de Medellín y la empresa Conalutra.

** Ph.D., Profesor Titular, Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Medellín. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9652-3310> Email: chidalgo@udemedellin.edu.co

*** MSc en Ingeniería Civil, Ingeniera Civil, Profesional Ambiental y Social, EPM (Empresas Públicas de Medellín), Medellín, Colombia. Email: ana4624@gmail.com

Evaluation of The Performance of Soil/Construction Waste Mixtures as an Alternative for The Improvement of Low Traffic Volume Road Subgrades

Abstract

Although they are of great economic importance for the communities, rural roads can generally be considered low traffic volume (LTV) roads, which makes their paving difficult to make financially feasible. As a result, most of these roads are unpaved, causing traffic difficulties, particularly during the rainy season. On the other hand, construction and demolition waste () is an environmental problem in cities; its use in road construction has been identified as an alternative for its final disposal. The purpose of this research was to evaluate an alternative for use in low traffic volume roads as a material for the improvement of pavement subgrades. Specifically, the use of waste from brick masonry construction (WBMC) or demolition was evaluated. A technical and economic evaluation was carried out, for which pavement designs were made by adding between 10 and 40 % of WBMCL and residual soil in determined proportions and compared with conventional pavement designs using granular materials from quarry exploitation. The same traffic conditions, subgrade soils and design methodologies were used for all designs. The results obtained show that the use of WBMC mixed with soil as a subgrade improvement results in reductions in pavement granular layer thicknesses that can make it possible to dispense with the granular subbase layer with the respective economic and environmental benefits.

Keywords: waste; demolition; brick; improvement; performance; subgrade.

INTRODUCCIÓN

Las vías de Colombia en total están compuestas por 206.708 kilómetros, de los cuales 142.284 kilómetros pertenecen a la red terciaria. El control de la mayoría de estas vías está en manos de los entes territoriales, pues más de 65 %, es decir, 92.485 kilómetros, están a su cargo; 18 % (25.611 kilómetros) es responsabilidad del Instituto Nacional de Vías (Invias), 9 % (12.806 kilómetros) de los departamentos y 8 % (11.383 kilómetros) hace parte de la red privada [1].

En los últimos años se ha observado un alto interés en buscar soluciones de bajo costo para intervenir las estructuras de vías, y ha tomado un fuerte auge el uso de materiales reciclados de diversos tipos y procedencias, como la cerámica, ladrillo, neumáticos, plástico, vidrio y demás elementos que suministren al pavimento la estabilidad requerida. Por ejemplo, en EEUU la Asociación Federal de Carreteras realiza actividades de reciclaje de pavimentos en hormigón; un ejemplo de ello fue la construcción en Wyoming (USA) de siete mil carreteras, en donde se aprovechó dicho material para la construcción de bases y subbases granulares, actividad que generó un ahorro del 16 % del costo total, respecto a la construcción con materiales convencionales [2]. En Pakistán [3] realizaron un estudio donde lograron demostrar que incluir en una estructura de pavimento materiales reciclados de pavimento asfáltico recuperado, combinados con materiales granulares naturales, da como resultado valores mayores de módulos resilientes en comparación a los obtenidos por materiales granulares naturales.

Por otro lado, los RCDL constituyen un problema ambiental debido a la alta generación y a las dificultades para su disposición final. De acuerdo con Marín [4], los RCDL generados por el desperdicio en la construcción de grandes edificios o en su defecto en la demolición de grandes estructuras, en Colombia constituyen en promedio el 40 % de los residuos sólidos, cuya producción media es de veintidós millones de toneladas aproximadamente.

En Colombia, al igual que en muchos otros países, la disposición final de estos materiales sigue siendo principalmente en vertederos [5], lo cual genera severos impactos ambientales que han sido verificado de diferentes formas. Por ejemplo, mediante Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se ha demostrado que la disposición en rellenos genera un mayor impacto que la alternativa de reciclar o reutilizar los RCD [6]. Debido a un mayor nivel de consciencia de los impactos causados y a normativas cada vez más exigentes, se están implementando estrategias que, en primera, instancia reduzcan la generación de residuos y, en segunda instancia, permitan la reutilización de los residuos generados. La reutilización de CDW en la construcción se ha venido promoviendo y en algunos países se han logrado altos niveles de aprovechamiento. En

Australia se recicla el 57 % de los RCD [7] y en algunos países europeos se ha logrado un aprovechamiento arriba del 90 % [6].

En Colombia, debido al crecimiento poblacional que se concentra en los centros urbanos, se ha generado igualmente un crecimiento urbanístico en las principales ciudades, generando a su vez una alta producción de RCD. Se estima que la mayor parte de los veintidós millones de toneladas de RCD, es dispuesta en rellenos o botaderos. Debido a los impactos asociados, en el año 2017 se reglamentó la gestión integral de los residuos de construcción y demolición (RCD), la cual indica que los grandes generadores deberán cumplir con unas metas de aprovechamiento que consisten en utilizar RCD aprovechables en un porcentaje no inferior al 2 % del peso total de materiales usados en obra e incrementar este porcentaje en un 2 % anual hasta alcanzar como mínimo el 30 %.

Esto ha llevado a que se impulse industrial y comercialmente la reutilización de RCD, especialmente de aquellos materiales que como el concreto, se usan como agregados para nuevos concretos. Sin embargo, otros RCD, tales como los de ladrillo, enchape cerámico y los suelos de excavación, aún son poco usados.

De acuerdo con lo mencionado, las razones de esta investigación se fundamentan en evaluar el efecto del mejoramiento de subrasantes usando RCDL de ladrillo (residuo resultante como desperdicio en la construcción de grandes edificaciones en sus procesos de instalación, corte, modulación y demolición), en los espesores de las capas granulares de un pavimento flexible. Se evaluó el comportamiento de mezclas de suelos limosos y RCD con tamaño de partículas variables entre 0,075 y 19 mm mediante ensayos de compactación e índice de soporte de california-CBR, considerando proporciones RCD/suelo del 0, 10, 20, 30 y 40. Adicional a evaluar el efecto del mejoramiento de la subrasante usando RCDL, también se quiere proporcionar un beneficio económico-ambiental para los entes territoriales o empresas que quiera intervenir estas vías. Aunque se sabe que cada suelo tiene otras propiedades importantes a ser evaluadas, dado que los análisis estructurales se basan en la capacidad de soporte del suelo medido a través del CBR (Californian Bearing Ratio - Relación de soporte de California), los resultados de esta investigación pueden proporcionar información útil para evaluar pavimentos sobre suelos con CBR bajos (menores a 8 %), por ejemplo, suelos blandos, suelos contaminados con materia orgánica, material volcánico, entre otros.

RCD COMO MATERIALES PARA VIAS

A nivel internacional, se ha encontrado que los materiales provenientes de RCD pueden ser usados como materiales para la construcción de carreteras, y se ha establecido que después de un proceso de trituración simple se pueden usar como materiales granulares, bien sea solos o mezclados con suelos. En este sentido, se ha identificado que cuando se

utiliza un gran volumen de residuos de concreto, la mezcla de RCD puede actuar como un material de base granular [6], [8], [9]. En cambio, un gran contenido de residuos de ladrillo en el RCD, deteriora su desempeño y no permite su uso como base granular [10]; pese a lo anterior, es posible su uso como material de subbase [10], [11] o como base estabilizada con cemento Portland [12], [13] o combinados con refuerzos de geosintéticos [14]. En todo caso, estos usos de los RCD permiten minimizar tanto la llegada de RCD a los vertederos y el uso de materiales vírgenes para la construcción de vías, lo cual resulta de alta pertinencia para contribuir a la reducción de la generación de gases de efecto invernadero, cuando se considera que la construcción de carreteras es responsable por el 30 % de las emisiones de estos gases y de aproximadamente el 25 % del consumo de combustibles fósiles [15], [16]. La evaluación del ciclo de vida asociado a materiales para la construcción de carreteras sostenibles es esencial para la toma de decisiones en cuanto a prácticas empleadas en las diferentes etapas de su construcción, debido a los impactos generados por la construcción tradicional [17].

En muchos países los ladrillos representan un alto porcentaje de los RCD [18], y, debido a sus características, no es viable incorporarlos como materiales para la construcción de edificaciones; sin embargo, se ha evidenciado un potencial para su uso en la construcción de carreteras y se han evaluado diversas aplicaciones [19], [20], [8], [9], [13]. Estos usos incluyen mezclas de RCD y suelo como material granular compactado [21], [22], [8], [9], [10] y mezclas RCD, y suelo estabilizados con cemento Portland [5], [13].

Las menores prestaciones de los RCD de ladrillo y de enchapes cerámicos están relacionadas con la composición de las partículas y su forma. De acuerdo con resultados publicados, RCD con alto contenido de ladrillo y enchape cerámico puede presentar problemas de fragilidad, debido a la forma aplanada de las partículas; y no es raro que agregados con alto contenido de ladrillo y enchape cerámico tengan índices de aplanamiento y alargamiento superiores al 50 % del volumen total de la muestra [23]. Otro factor importante son las especificaciones para materiales empleados en la construcción de pavimentos y que los RCD no cumplen, es el desgaste en la máquina de los Ángeles como lo muestra Pourkhorshidi, et al. [23].

En los Países Bajos [24], los autores realizaron comparativos del comportamiento del suelo adicionado con agregado reciclado o con agregado natural (AN). Las mezclas con residuos tenían más del 90 % con residuo de concreto y ladrillo cerámico, y algunas de ellas con más del 95 % de agregado de concreto y concluyen que la absorción de agua de los residuos es mayor, debido a que los materiales originales de los RCD tienen una alta capacidad absorción, como es el caso de los ladrillos de arcilla, lo cual concuerda con otros trabajos [23]. Los valores de absorción encontrados variaron entre

1,6 y 5 % para los agregados naturales, y llegaron hasta del 15 % para los agregados provenientes de residuos. La densidad también varía dependiendo del material, disminuyendo a medida que se incrementa el contenido de materiales como el ladrillo y el enchapé cerámico. Se encontraron valores hasta de 1.300 kg/m³, muy baja en comparación de la densidad normal de un agregado cuyos valores son del orden de 2.600 kg/m³. También se pudo observar que con el incremento del contenido de RCD se aumenta el contenido de humedad óptimo, disminuye la densidad seca máxima y aumenta el CBR.

Se ha comprobado que aunque la mezcla de ladrillo y enchape cerámico mejoran algunas características de los materiales, no es posible usarlas como material estructural para pavimentos; sin embargo, existen indicios de que se podrían implementar como materiales para el mejoramiento de rasantes y en capas estructurales que no estén sujetas a cargas vehiculares directas [14]. De acuerdo con lo anterior, el uso de mezclas de suelo-RCD como material para la construcción de carreteras se constituye como una alternativa eficiente para el aprovechamiento de los RCD de ladrillo y de enchape cerámico. Sin embargo, es escasa la información disponible para determinar su dosificación y establecer el nivel de desempeño en las obras.

Lo anterior muestra que algunos de los RCD pueden ser utilizados como material para el mejoramiento de vías de bajo volumen de tránsito, en especial las capas inferiores a la altura de la subbase o subrasante [23]; sin embargo, no fueron encontradas evidencias sobre el aporte en la disminución del espesor de los pavimentos al incluir RCD_L procedente de diferentes materiales, entre ellos el ladrillo, como parte de la subrasante y cuál sería el impacto sobre la economía de las obras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del proyecto evaluación del desempeño de mezclas de suelos con residuos de construcción y demolición (RCD), y para el mejoramiento de subrasantes de vías de bajo volumen de tránsito, se describe la metodología fraccionada en cuatro fases.

Fase 1. Caracterización del material de ladrillo y del suelo de subrasante

La caracterización de material de residuo de construcción y demolición compuesto por ladrillo de arcilla (RCD_L) a emplear, se realizó en el marco del proyecto de investigación de la Universidad de Medellín y la Constructora Conaltura, titulado “Optimización de materias primas y su uso en proyectos de construcción” [25]. En esta investigación se analizó el material de RCD_L procedente de la Obra Guayacanes del Sur, torre de 25 niveles de viviendas de interés social (VIS) ubicado en el municipio de Itagüí, Antioquia, en el que se evaluaron sus propiedades físicas y se determinaron

las limitantes que conllevaría su uso. Dentro de esta investigación, aparte de establecer las características del RCD_L, se logró determinar la cantidad de desperdicios de mampostería de ladrillo de arcilla procedente de las actividades de instalación, corte, modulación y demolición, en la que en total se obtuvo un desperdicio de setenta y un toneladas de ladrillos.

En la clasificación del suelo residual se tomó una muestra alterada de un apique o calicata en las zonas verdes del campus de la Universidad de Medellín, el cual pertenece al *stock* de Altavista. Con el material pasante por el tamiz de malla de 1" (una pulgada) de abertura, se realiza la granulometría de la muestra hasta el tamiz No. 200 (I.N.V. E - 213) para obtener su densidad específica, densidad suelta, absorción de agua (I.N.V. E - 22), resistencia a la compresión (I.N.V. E - 152), ensayo de compactación (I.N.V. E - 141), entre otras propiedades.

Fase 2. Diseño de estructuras de pavimentos y cálculo de deformaciones de estructuras con adición de RCD_L

En esta fase se diseñaron estructuras de pavimentos por el método del Invias y el método INA, y empleando el software Cedem (Programa para cálculo de esfuerzos y deformaciones) [26], introduciendo diversas variables previamente definidas, las cuales se describirán más adelante, se calcularon los esfuerzos y deformaciones en las capas que conforma la estructura. Con el método Invias se estableció la estructura de pavimento inicial (sin contenido de RCD), con el método INA se hallaron las deformaciones admisibles de las capas y con el software Cedem se calcularon los esfuerzos y deformaciones en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y la deformación en la fibra superior de la subrasante para validar que las deformaciones halladas por el método INA fueran inferiores a las admisibles. Posteriormente, se realizaron las modelaciones para analizar el comportamiento de las cargas aplicadas sobre la estructura diseñada.

Diseño empírico de pavimentos por el Invias

Para establecer la estructura de pavimento inicial se empleó el método Invias, donde previamente se determinó la región climática (17,33°C Valle de Aburra) [27] y la precipitación media (1540.5 mm) [28] donde se realizaría el diseño de pavimento, de acuerdo con los quinientos mil ejes equivalentes definidos para este estudio. Con un valor de CBR del suelo residual de 6,4 %, se procedió con el cálculo del módulo resiliente con la ecuación $M_{r_{SR}} = 100 * CBR$ (kg/cm²), obteniendo un valor de 640 kg/cm². Con estos datos definidos y calculados, se remitió a la cartilla de diseño de pavimentos del INVIAS como también al libro Ingeniería de Pavimentos de Carreteras [29], en la que se precisó la estructura de pavimento inicial compuesta por SBG (subbase granular) = 40,0 cm, BG (base granular) = 15,0 cm y MDC (mezcla densa en caliente) = 7,5 cm.

Diseño racional de pavimento por el INA

Para calcular la estructura de pavimento por el método INA (Instituto del asfalto), inicialmente se definieron parámetros como radio de carga (0,125 m), presión de contacto (0,662 MPa) y distancia entre eje de llantas (0,375 m), de acuerdo con los valores recomendados por Reyes [30]. Igualmente, se calcularon los módulos resilientes de cada una de las capas y se establecieron los valores de Poisson. Para calcular los módulos de la subrasante, se empleó la ecuación de Ivanov (ecuación que permitió calcular un módulo resiliente de materiales combinados) $Mr_{SR}=130*CBR^{0,714}$ (kg/cm²), para las capas granulares de base y subbase se calculó con la ecuación de Dormon y Metcalf (1965) que indica $E_{Base\ o\ subbase}=0,206*h^{0,45}*E_i$, donde la $E_{base\ o\ subbase}$ se da en km/cm², E_i es el módulo resiliente de la capa subyacente en kg/cm² y h es el espesor de la capa granular en mm, y para el cálculo del módulo elástico de la carpeta asfáltica se empleó la ecuación de coeficiente estructural $a^1=0.184*\ln(E_{CA})-1.9547$ [30], despejando E_{CA} y reemplazando el a_1 por 0.37 (valor establecido en el Manual de diseño de pavimentos [31]), se obtiene $E_{CA}=e^{((a^1+1.9547)/0.184)}$. Los valores de Poisson (ν), se establecen de acuerdo con los recomendados en el libro de Rondon y Reyes [30], para la carpeta asfáltica 0,35, para base y subbase granular 0,4 y para subrasante 0,45.

Los resultados obtenidos de las ecuaciones antes relacionadas se detallan en la tabla 1, partiendo de los espesores iniciales de las capas de la estructura de pavimento, obtenidos por el método Invias.

Tabla 1. Espesor de capas de pavimento y Mr calculados

Capas	Espesor (m)	Mr ó E (Kg/cm ²)	Mr ó E (MPa)	Poisson
MDC-2 ⁽¹⁾	0,075	21485,2	2106,97	0,35
BG-1	0,15	4800,9	470,8	0,4
SBG-2 ⁽²⁾	0,20	2444,7	239,7	0,4
SBG-1 ⁽²⁾	0,20	1093,7	107,3	0,4
SR	-	489,3 ⁽³⁾	48,0	0,45

Fuente: elaboración propia.

Donde:

MDC: Mezcla densa en caliente.

BG: Base granular.

SBG: Subbase granular.

SR: Subrasante.

Nota:

- (1) El análisis de la estructura se concentra en el comportamiento de las capas granulares de base y subbase, por lo que el espesor de la capa asfáltica se deja estable en 7,5 cm durante todo el ejercicio.
- (2) El espesor de la subbase granular se subdivide en dos capas a razón del estudio realizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América, el cual llegó a la conclusión de que para el evento en que las capas de base y subbase granular fueran muy robustas, es necesario subdividir las de tal manera que el espesor de la capa de base granular no supere los 250 mm y la capa de subbase no supere los 200 mm [32]; el beneficio de subdividir las capas se logra identificar en los cálculos experimentales desde el software CEDEM, en el que dividiendo la capa de subbase, potencia el módulo resiliente, generando que los espesores de capas de la estructura sean más ajustados a los requerimientos.

En el software Cedem se ingresaron los datos como se muestran en la figura 1, para obtener los valores de las deformaciones de la estructura original como se observa en figura 2, dando como resultado para la capa asfáltica (ϵ_t) $236.0E^{-6}$ y en la subrasante (ϵ_v) $562.0E^{-6}$.

Figura 1. Variables calculadas y parámetros establecidos

The screenshot shows the CEDEM software interface with the following data:

Archivo Datos Calcular Ayuda

Datos | Información de la Estructura | Resultados

Número de Capas : 5

Radio de la Carga (a) : 0.125 [m]

Presión de Contacto (q) : 0.662 [MPa]

Distancia entre Ejes de Llantas (D) : 0.375 [m]

Capa N°	E [MPa]	μ []	H [m]	Ligada / No ligada
1	2106.99	0.35	0.075	L
2	470.8	0.4	0.15	L
3	239.7	0.4	0.2	L
4	107.3	0.4	0.2	L
5	48	0.45		
6				

Buttons: Calcular..., Insertar capa..., Eliminar capa...

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Deformaciones obtenidas de la estructura inicial

Capa N°	Z [m]	Epsilon T	Sigma T [MPa]	Epsilon Z	Sigma Z [MPa]
1	0.00	396.0E-6	1.5601	-180.0E-6	0.6618
	0.08	-236.0E-6	-0.5231	381.0E-6	0.4385
2	0.08	-236.0E-6	0.1173	744.0E-6	0.4385
	0.23	-339.0E-6	-0.1377	500.0E-6	0.1407
3	0.23	-339.0E-6	-0.0274	634.0E-6	0.1407
	0.43	-313.0E-6	-0.0811	456.0E-6	0.0506
4	0.43	-313.0E-6	-0.0176	577.0E-6	0.0506
	0.63	-274.0E-6	-0.0288	455.0E-6	0.0271
5	0.63	-274.0E-6	-0.0006	562.0E-6	0.0271
6					

Deflexión : 83.54 [mm/100]
 Radio de Curvatura : 125.50 [m]

Fuente: elaboración propia.

Donde:

Epsilon T: Deformación a tracción máxima en la capa asfáltica.

Sigma T: Esfuerzo en la capa asfáltica.

Epsilon Z: Deformación vertical máxima en la fibra superior de la subrasante.

Sigma Z: Esfuerzo en la subrasante.

Con estos valores se calculó el número de ciclos de carga a la falla en la carpeta asfáltica (N_f) y de la subrasante (N_d), empleando las ecuaciones de leyes de fatiga del Instituto del Asfalto, obtenidas de la Guía metodológica para diseños de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras [33].

La ecuación de fatiga de la capa asfáltica equivale a $N_f = 18.4 \cdot (C)^* [6.167 \cdot 10^{-5} \cdot \epsilon_t^{-3.291} |E^*|^{(-0.854)}]$, donde ϵ_t es la Deformación unitaria de tensión en la capa asfáltica (mm/mm), $|E^*|$ es el Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (MPa), C es la Función dependiente de los volúmenes de vacíos con aire (V_a) y de asfalto (V_b) en la mezcla compactada, los cuales están en porcentaje y para calcular C se emplearon las siguientes ecuaciones $C = 10^M$ y $M = 4.84 \cdot V_b / (V_a + V_b) - 0.69$. Para el cálculo de M, se recomiendan valores de vacíos con aire (V_a) de 4 % y con asfalto (V_b) de 12 % para una mezcla convencional [33], dando como resultado $N_f = 2777371.9$.

La Ecuación de fatiga de la subrasante equivale a $N_d = 1,365 * 10^{-9} (\epsilon_v)^{-4,477}$, donde se reemplazó el valor de ϵ_v = Deformación de la subrasante (mm/mm) calculado anteriormente, obteniendo un resultado de $N_d = 582033,9$.

Con los resultados del número de ciclos de carga a la falla de la capa asfáltica y de la subrasante, al superar los quinientos mil ejes equivalentes, se comprobó que la estructura planteada inicialmente cumplió con las exigencias del tránsito; si estos ciclos de carga dan como resultado un valor inferior a la cantidad de ejes equivalentes de diseño, se debe plantear otra estructura donde se varíen los espesores gradualmente cada 2,5 cm (1") de las capas granulares y se vuelve a verificar.

Este método del INA permite ajustarse a las condiciones de la estructura de pavimento al momento e incorporar RDCL, porque establecer una mejor correlación entre el módulo resiliente de la capa a calcular con la capa de soporte (es decir la capa subyacente); además, por la objetividad en el cálculo de sus variables. Por lo tanto, con esta metodología se elabora el diseño de la estructura de pavimento con la adición del suelo + RDCL como se describe a continuación.

Elaboración de diseños de estructuras de pavimento por método INA con adición de capa de suelo + RCD_L

De acuerdo con el procedimiento anterior, se incluye la capa de suelo+ RCD_L entre la subrasante y la subbase, con el fin de calcular las deformaciones de la capa asfáltica y la subrasante con la influencia de esta capa sobre la estructura de pavimento. Para hallar el módulo resiliente (E ó M_r) de esta capa, con las ecuaciones (1) y (2), se calculan los valores de CBR, de acuerdo con el porcentaje de RDCL y con la Ecuación de Dormon y Metcalf (1965) explicada anteriormente ($E_{\text{Base o subbase}} = 0,206 * h^{0,45} * E_i$) se calcula el módulo resiliente, obteniendo los datos que se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de CBR de acuerdo con el contenido de RCD_L

(%)	CBR (%)	Mr (Kg/cm ²)	Mr (PSI)
0	6,4	489,82	6966,91
10	10,1	677,62	9638,04
20	15,9	937,43	13333,28
30	25,1	1296,84	18445,28
40	34,6	1631,60	23206,72
50	57,5	2346,25	33371,48
60	87,1	3157,01	44903,08

Fuente: elaboración propia.

Con los valores de M_r para diferentes porcentajes de RCD_L, se tomó la ecuación de Dormon y Metcalf (1965) $E_{\text{Suelo+L}} = 0,206 * h^{0,45} * E_{SR}$, se despejó h en función del M_r

de la capa de suelo+RDC_L y de la subrasante, obteniendo la siguiente ecuación, la cual permite conocer el espesor de la capa de suelo+RDCL, $h=(E_{\text{suelo+}})/(0.206* E_{\text{SR}})^{1/0.45}$. Estos valores calculados y los determinados anteriormente, se ingresan en el software Cedem, incluyendo la capa de suelo+ RDC_L, para lograr las deformaciones en la capa asfáltica y subrasante e igualmente se calcula el número de ciclos de falla.

Fase 3. Optimización de los espesores de capas de suelo de subrasante estabilizado con RCD_L y elaboración de curvas de diseño para vías de bajo volumen de tránsito

Empleando el método numéricos multicapa del INA (Instituto del Asfalto), se hallaron las deformaciones admisibles de la estructura, introduciendo espesores, módulo resiliente y coeficiente de Poisson de cada una de las capas que conforma el pavimento. Empleando el software Cedem se calcularon los esfuerzos y deformaciones en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y la deformación en la fibra superior de la subrasante, para validar que las deformaciones halladas fueran inferiores a las admisibles, permitiendo la optimización de los espesores de la estructura de pavimento. Posteriormente, se realizaron las modelaciones para analizar el comportamiento de las cargas aplicadas sobre la estructura diseñada.

En la estimación de los espesores de las capas de base y subbase granular, se plantearon diversas estructuras de pavimento cumpliendo el número de ciclos de carga de falla por encima de los ejes equivalentes establecidos quinientos mil. Esta optimización de espesores de capas se determinó partiendo del criterio de parada establecido, donde se logra obtener una estructura competente en la que converge con una relación de $N_{\text{diseño}}/N_f$ entre 90 % y 100 %, equivalentes a valores entre quinientos mil y 555.555 ejes equivalente de 8,2 toneladas, para evitar una estructura sobredimensionada y, por ende, un mayor costo para la construcción del pavimento.

Fase 4. Estimación de cantidad de RCD_L a emplear y beneficios económicos

Con los porcentajes de RCD_L óptimos a emplear dentro de la estructura de pavimento, se calcula el volumen de material de RCD_L que se requirió para construir una capa mezclada de suelo+ RCD_L, se calcularon los costos y se compararon. Los beneficios esperados están determinados por la reducción de los espesores de las capas estructurales del pavimento, traducidos en beneficios económicos.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

De las fases antes mencionadas, se desglosa paso a paso lo realizado en cada una de ellas, para lograr los resultados esperados.

Fase 1. Caracterización del material de ladrillo y del suelo de subrasante

Para evaluar el comportamiento de las mezclas de suelos con residuos de ladrillo, se analizaron individualmente las características del RCD_L y del suelo residual (empleando la norma INVIAS 2013) con los ensayos antes mencionados, con el fin de elaborar mezclas con proporciones diferentes de RCD_L [25]. Se describen a continuación, dichos análisis y sus resultados.

Características físicas del RCD_L de ladrillo

Del residuo de mampostería de ladrillo generado por la construcción del proyecto de viviendas Guayacanes del Sur [25], se extrajo una muestra de 200 kg, aproximadamente, eliminando visualmente los materiales diferentes al ladrillo, para luego someterla a un tamizaje para retirar los sobretamaños, en la que se obtiene un volumen de 20 % de residuos de material con tamaños entre 1"-3" y el 80 % de volumen restante, en partículas de tamaño inferior a 1" y proceder con los ensayos antes mencionados, donde sus resultados se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Caracterización del material de RCD_L y del suelo

Descripción	Suelo	
	Suelo fino granular, A-7 según la clasificación AASHTO	L Agregado forma conoidal y alargado
Tamaño máximo partícula (mm)	9,5	76,6
Pasante No. 200 (%)	65	0,31
Contenido de humedad óptima (%)	19,8	14,3
Peso unitario seco máximo (kg/m ³)	1582,6	1774,1
Relación de soporte – CBR (%)	6,18	Ver tabla 4.

Fuente: [25]

Caracterización del suelo de subrasante

Del suelo procedente del *stock* de Altavista se realizaron ensayos de granulometría y límites de consistencia que arrojaron resultados de límite líquido de 43 % y límite plástico de 30 %, con estos resultados el suelo se clasifica como A-7 según la clasificación Aashto y de acuerdo con el sistema de clasificación unificado de suelos es MH [25].

De esta clasificación se obtiene un porcentaje de material fino (limos y arcillas) del 65 %, adicionalmente presentó una humedad óptima de 19,8 % y una densidad seca máxima de 15,5 kN/m³. Calculando su capacidad de soporte, en laboratorio se realiza el ensayo de índice de soporte de california (CBR), después de un periodo de inundación de noventa y seis horas arrojando un resultado de 6,18 % de capacidad.

Caracterización de mezclas de Suelo + RCD_L

Para las mezclas de suelo más RCD_L se caracterizaron, a través del ensayo de Proctor modificado, humedad óptima, densidad húmeda y seca, resultados de CBR de 0,1" y 0,2". Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de ensayos para las diferentes mezclas de suelo y RCD_L

Contenido (%)	Humedad óptima (%)	Densidad húmeda (kg/m ³)	Máxima densidad seca (kg/m ³)	CBR 0,1" (%)	CBR 0,2" (%)	Expansión (%)
0	19,8	1896	1582	4,64	6,2	2,28
15	18,15	1890	1600	5,07	8,7	5,6
30	16,5	1880	1600	5,07	8,8	4,77
45	14,85	1900	1650	13,04	15,5	2,81
60	13,2	1970	1730	30,7	61,8	0,7
75	11,55	1960	1750	150,7	115,9	0,43

Fuente: [25]

En la tabla anterior se puede observar que, de acuerdo con el aumento del contenido del RCD_L, aumenta el CBR del material, muy probablemente se da al remplazo del material fino del suelo por el material granular del RCD_L; así mismo, a medida que aumenta el contenido de RCD_L, el peso unitario del material compactado de la mezcla del material, aumenta.

La necesidad de mejorar las condiciones portantes del suelo natural de la subrasante brinda la posibilidad de hacer uso del RCDL de ladrillo como medio para mejorar esta característica, lo que permite construir estructuras más esbeltas por consecuencia del aumento del CBR de la subrasante, empleando material natural de explotación en menos proporción y haciendo uso del RCDL, generando una compensación ambiental y económica.

Para determinar el valor del CBR, de acuerdo con el contenido de RCD_L y con base a investigaciones realizadas en la Universidad de Medellín [25], donde se analizó el comportamiento de las mezclas de suelos con residuos de ladrillo, al igual que el comportamiento del suelo con residuos cerámicos [34], arrojó como resultado dos ecuaciones, una para CBR de 0 a 40 % (ecuación 1) y otra ecuación para CBR mayor a 40 % (ecuación 2), como se observa a continuación.

$$CBR = 6,41e^{\left(\frac{RCD}{22}\right)} \text{ si } RCD < 40 \% \quad (1)$$

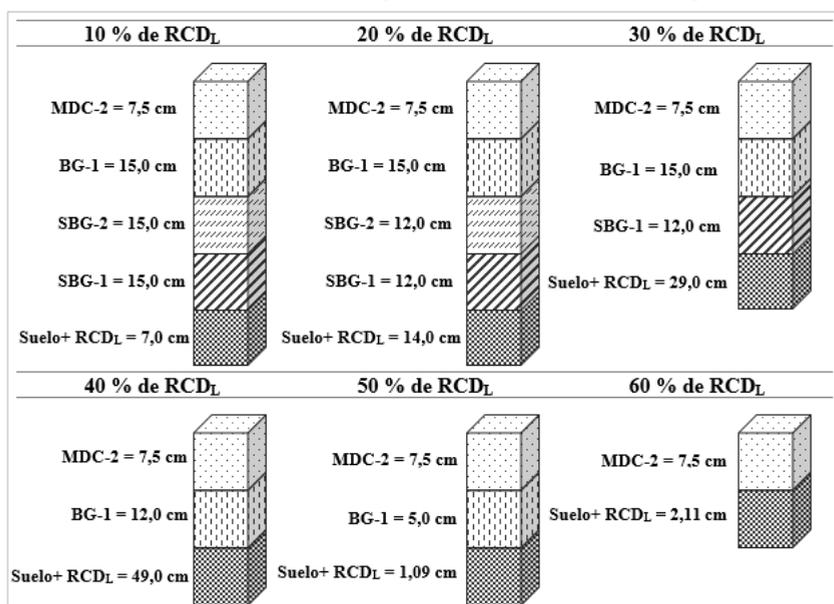
$$CBR = \frac{RCD^{2.28}}{130} \text{ si } RCD \geq 40 \% \quad (2)$$

Fase 2. Diseño de estructuras de pavimentos y cálculo de deformaciones de estructuras con adición de RCD_L

En esta fase se determinó la composición de la estructura de pavimento inicial y del pavimento donde se incorpora RCD_L , para calcular su respectiva deformación en la fibra inferior de capa asfáltica y en la fibra superior de la subrasante.

Realizando diversas modelaciones y ajustando los números de ciclos de falla un poco por encima de los quinientos mil ejes equivalente, se obtienen las estructuras que se visualizan en la figura 3.

Figura 3. Estructuras obtenidas por el método INA incluyendo la capa de suelo+ RCD_L y de acuerdo con el % de RCD_L



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con estos valores, se logra evidenciar la incidencia que tiene la capa de suelo+ RCD_L sobre la estructura de pavimento, que genera que la estructura sobre esta capa sea más competente (mayor absorción de cargas), en comparación con la estructura sin incluir esta capa de suelo+ RCD_L , logrando suprimir el espesor de base y subbase de acuerdo con el contenido de RCD_L .

Los resultados plasmados en la figura 3 únicamente son para demostrar el efecto del RCD_L dentro de la estructura de pavimento; ahora bien, en cuestión de aplicabilidad es razonable emplear contenidos de 30 % y 40 % de RCD_L para proporcionar capas granulares de base y subbase, y capa de suelo+ RCD_L constructivamente viables, porque,

como se muestra para el caso del 10 % de RDCL, construir una capa de 7 cm de suelo+ RDCL, o así mismo para contenidos mayores de 50 % con capa superior a 100 cm, complejiza su ejecución con los equipos convencionales de obra.

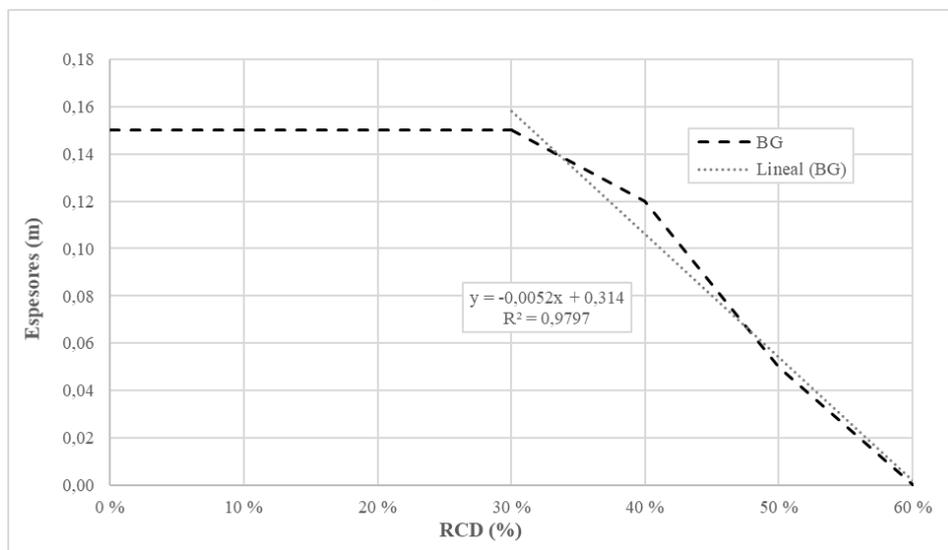
La capa de suelo+ RDCL se decide no subdividirla por diseño, debido a que dificulta el cálculo de la estructura dentro del software CEDEM, por convertirse en una serie de subcapas, para el caso en el que tenemos remplazos mayores de 1,0 m; adicionalmente, por convertirse en una capa de mejoramiento en el que queremos analizar su interacción dentro de la estructura de pavimento, se analizó como una capa entera.

Fase 3. Optimización de los espesores de capas de suelo de subrasante estabilizado con RDCL y elaboración de curvas de diseño para vías de bajo volumen de tránsito

Con el proceso de optimización descrito, se obtuvo las estructuras de pavimento que se observan en la , calculadas a través de diversas modelaciones y optimizados sus espesores con base al criterio de parada.

En las figuras 4, 5 y 6 se encuentran las curvas de diseño para vías de bajo volumen de tránsito, en las que se indican los espesores de la capa de base y subbase granular, de acuerdo con el contenido adicionado de RDCL a la capa de suelo residual. En la , a partir de la adición de 30 % de RDCL, empieza a tener la capa de base una reducción significativa en su espesor hasta suprimir por completo esta capa cuando se alcanza una adición de 60 % de RDCL.

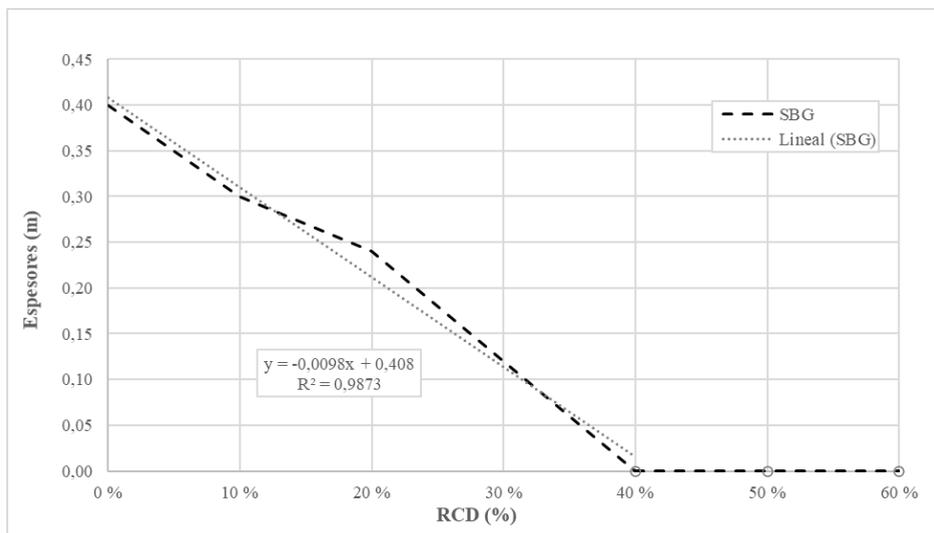
Figura 4. Contenido de RDCL vs. espesor de capa de base granular.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se observa una notoria reducción del espesor de la subbase, prontamente se empieza a incluir el RDCL en la estructura de pavimento, esta capa se suprime cuando hay una adición del 40 % o más de RDC_L .

Figura 5. Contenido de RDC_L vs. espesor de capa de subbase granular

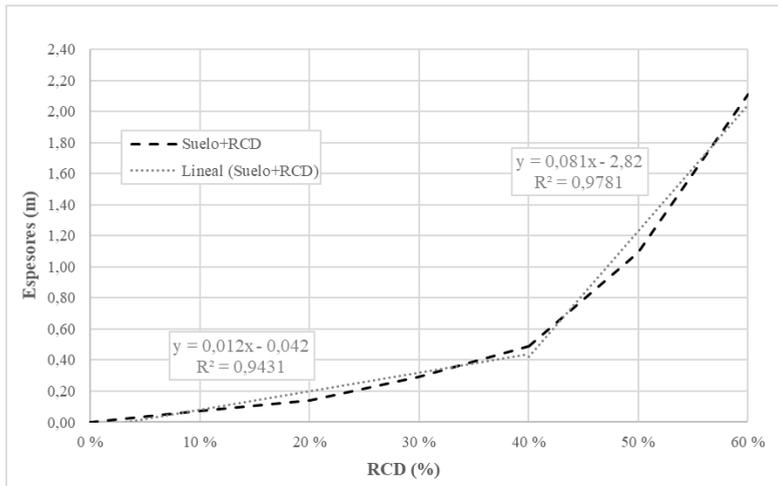


Fuente: elaboración propia.

En los espesores de base granular, incide el RDC_L en contenidos superiores 40 %, reduciéndola de 15 cm a 12 cm, con 50 % de RDC_L se reduce en 5 cm y en 60 % de RDC_L se suprime esta capa. Respecto a la subbase al 10 % de RDC_L se reduce de 40 cm a 30 cm de espesor, con 20 % de RDC_L a 24 cm, con 30 % a 12 cm y con 40 % de RDC_L de suprime esta capa.

La indica el espesor de la capa de suelo+RDCL, de acuerdo con el contenido adicionado de RDCL a la capa de suelo residual. En esta grafica se evidencia el significativo aporte que le proporciona esta capa de suelo+RDCL a la estructura de pavimento, también se observa que a partir del 40 % de adición de RDCL, el espesor del suelo+RDCL incrementa sustancialmente, generando una capa de gran proporción y constructivamente más robusta, lo que concluye que las adiciones más óptimas dentro de la estructura de pavimento son entre 10 % y 40 % de RDCL.

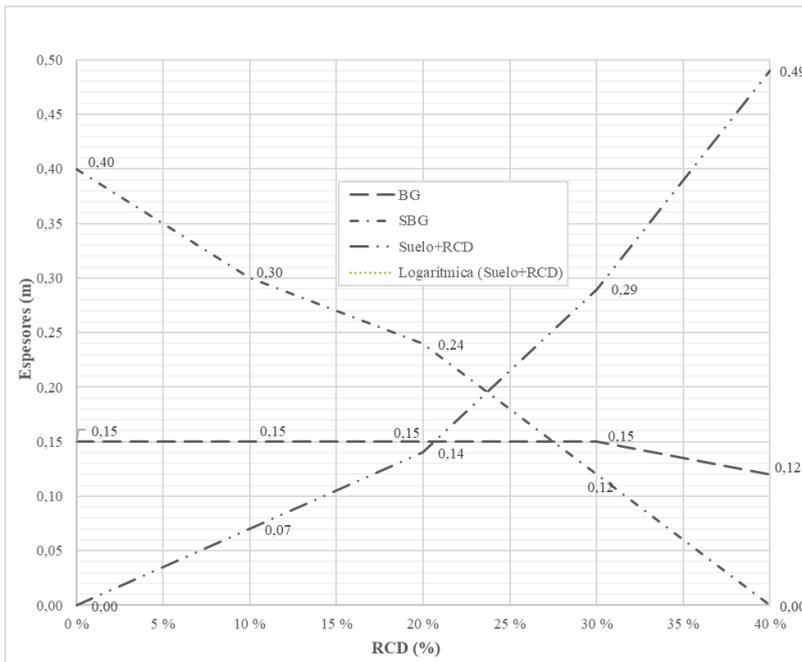
Figura 6. Contenido de RDC_L vs. espesor de capa de suelo+ RDC_L



Fuente: elaboración propia.

En la se muestra la combinación de las tres capas granulares que componen la estructura de pavimento (incluyendo la capa de suelo+ RDC_L), según el contenido de RDC_L que se adicione.

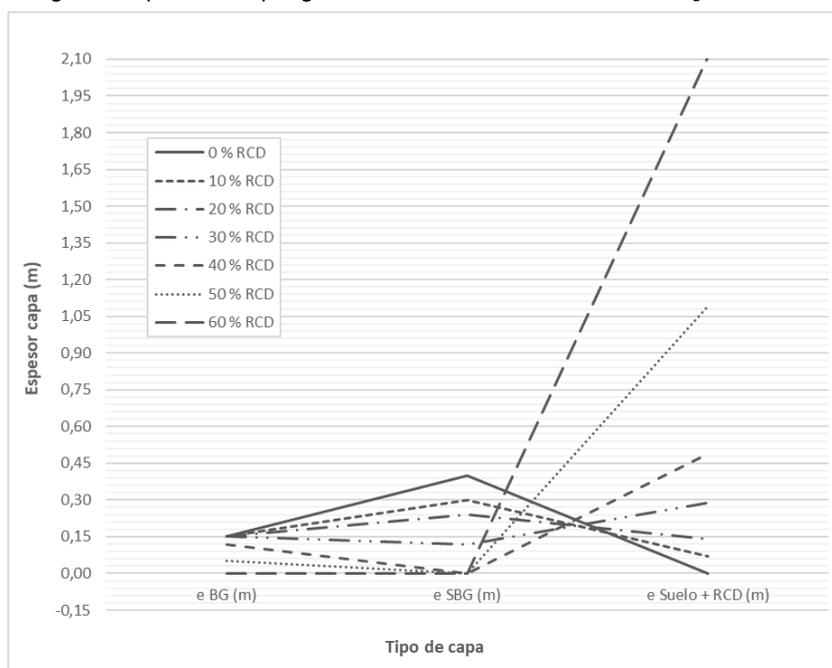
Figura 7. Espesor de capas granulares de acuerdo con el % de RDC_L (0 % - 40 %)



Fuente: elaboración propia.

En la se visualiza el comportamiento de las capas de la estructura completa según su adición de RDC_L , donde se evidencia la reducción significativa de los espesores de las capas de base y subbase a medida que se adiciona mayor porcentaje de RDC_L y el incremento del espesor de la capa de suelo+ RDC_L , siendo esta capa cada vez más competente dentro de la estructura.

Figura 8. Espesor de capas granulares de acuerdo con el % de RDC_L (0 % - 40 %)



Fuente: elaboración propia.

Fase 4. Estimación de cantidad de RDC_L a emplear y beneficios económicos

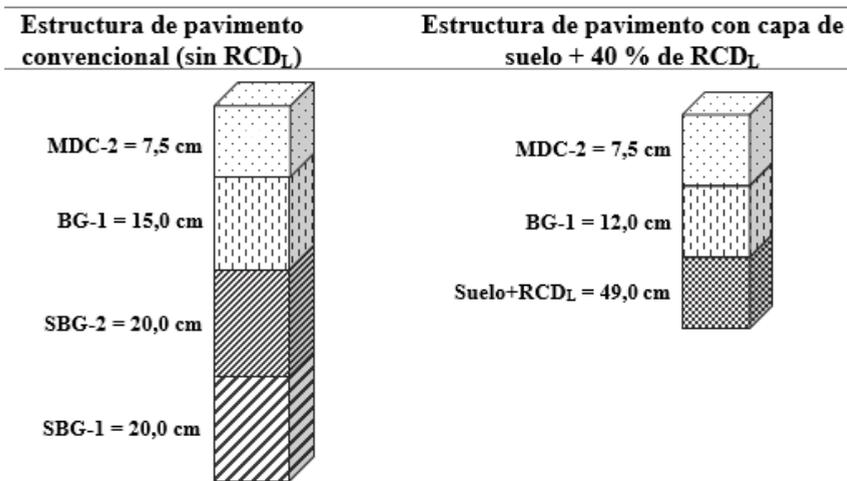
En la estimación de la cantidad de RDC_L a emplear y los beneficios económicos, se analizó el caso particular de la Obra Guayacanes del Sur, una torre de veinticinco niveles de viviendas de interés social (VIS) ubicado en el municipio de Itagüí, Antioquia. Se calculó la cantidad y el costo que tendría construir la estructura de pavimento de la vía interna para el ingreso de la unidad cuya área corresponde a 280 m^2 aproximadamente una longitud de $50,0 \text{ m}$ y un ancho de $5,6 \text{ m}$.

El material de RDC_L a emplear es el proveniente del desperdicio del corte, modulación y demolición de la mampostería de ladrillo que equivaldría a setenta y un toneladas, tomando como referencia la tabla de densidades de materiales de ITOMAK [35], la densidad de muros de ladrillos huecos corresponde a $59,2 \text{ m}^3$, hallando un

valor de 1,2 t/m³ y el material de suelo será el del área propia donde se construirá el pavimento de la vía de acceso. Este análisis se realiza partiendo de lograr una estructura competente, que disminuya gastos de base y subbase granular.

En la figura 9 se observa la estructura calculada inicialmente y la estructura incluyendo la capa de suelo+ RDC_L obtenidas por el Invias y por el INA respectivamente. En la tabla 5 se presentan los costos de las capas de pavimento procedentes de un análisis de diversos valores del mercado conseguidos de las empresas Procopal y Mincivil, las cuales realizaron construcción de pavimentos en las vías de acceso hacia el municipio de Ituango, estos valores incluyendo transporte, colocación y conformación del material; y en la tabla 6 se presentan los costos de la estructura de pavimento incluyendo la capa de suelo con el 40 % de contenido de RDC_L.

Figura 9. Estructuras de pavimento para análisis de costos.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Costos de capas de pavimento convencional

Tipo de capa	Volumen	Costo
MDC-2	280m ² x 0,075 m= 21,0 m ³	\$450.800/m ³ x 21,0 m ³ = \$ 9.466.800
BG-1	280m ² x 0,15 m= 42,0 m ³	\$70.100/m ³ x 42,0 m ³ = \$ 2.944.200
SBG-2	280m ² x 0,20 m= 56,0 m ³	\$32.500/m ³ x 56,0 m ³ = \$ 1.820.000
SBG-1	280m ² x 0,20 m= 56,0 m ³	\$32.500/m ³ x 56,0 m ³ = \$ 1.820.000
Costo total =		\$ 16.051.000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Costos de capas de pavimento con capa de suelo+ RDC_L.

Tipo de capa	Volumen	Costo
MDC-2	280m ² x 0,075 m= 21,0 m ³	\$450.800/m ³ x 21,0 m ³ = \$ 9.466.800
BG-1	280m ² x 0,12 m= 33,6 m ³	\$70.100/m ³ x 33,6 m ³ = \$ 2.355.360
Suelo+ RDC _L	280m ² x 0,49 m= 137,2 m ³	\$10.980/m ³ x 54,9 m ³ = \$ 602.802
Costo total =		\$ 12.424.962

Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo aproximado del costo de esta capa, se determinó el volumen de la capa de suelo+RDC_L correspondiente a 60 % de suelo del sitio y 40 % de RDCL, este último es igual a 54,9 m³, el cual será la cantidad de material a triturar. Este material se trituraría para obtener tamaño de partículas de ¾", en el que se emplearía la trituradora de cono Telsmith 36S, la cual tiene un rendimiento aproximado de 54,430 kg/h, empleando alrededor de dos horas para triturar el material total de residuo, esta máquina tendría un costo por hora de \$325.000 [36]. El valor de la trituración del residuo del ladrillo tendría un costo de \$650.000, que dividiéndolo el 59,2 m³ que equivalen las setenta y un toneladas, costaría \$10.980/m³, el resto de las maquinarias serían las que empleadas tradicionalmente en la obra.

Estos costos corresponden a 50,0 m de longitud de pavimento aproximadamente, en los que para 1,0 km equivalen a \$321.020.000. Igualmente, estos costos corresponden a 50,0 m de longitud de pavimento aproximadamente, en los que para 1,0 km equivalen a \$248.499.240.

En conclusión, se obtiene un ahorro por kilómetro de setenta y dos millones aproximadamente, equivalente al 22,5 % empleando una estructura de pavimento incorporando una capa de suelo+ RDC_L, haciendo uso de los residuos generados por la construcción de la obra, adicionalmente ahorrando el costo que tendría el constructor para transportar las setenta y un toneladas equivalente a 59,2 m³ de residuos generados hacia un sitio de acopio autorizado.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se muestra que al agregar diferentes cantidades de RCD_L al suelo estudiado, se mejora notoriamente las propiedades de la subrasante. Lo anterior incrementa la capacidad portante y proporciona una disminución notoria de las capas granulares de las bases y subbase.

La incidencia que tiene la incorporación de la capa de suelo+RCD_L en la estructura de pavimento de acuerdo con el contenido de RCD_L, logra reducir considerablemente la capa de subbase, hasta llegar a omitirla dentro de la estructura.

Calculadas todas las estructuras de pavimento, variando el porcentaje de contenido de RDCL, que a su vez influye en el espesor de la capa de suelo+ RDCL, se concluye que, para mejorar las condiciones de soporte de la capa de suelo residual de la zona estudiada, la adición más conveniente de RDCL se puede establecer entre el 30 % y 40 %, porque es donde el espesor de la capa de suelo+RDCL logra reducir significativamente el espesor de la capa de subbase granular.

Con base al costo de construcción de una estructura de pavimento convencional frente a una estructura adicionando, se puede obtener una reducción de costos alrededor del 33 %, sin mencionar los beneficios ambientales que se tendrían el hacer uso de estos residuos de construcción, que podría ser otra temática de investigación, en la que se cuantifique el material natural que se dejaría de explotar, mitigando el impacto generado en las canteras.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mi familia y a los profesores Cesar Hidalgo M., Mario Hernandez A., Gloria Carvajal P., Carlos Marín U. y Mario Rodríguez M.

REFERENCIAS

- [1] C. Rodriguez, “Del total de la red vial terciaria con la que cuenta Colombia, 96 % está en mal estado”, *La República*. <https://www.larepublica.co/infraestructura/del-total-de-la-red-vial-terciaria-con-la-que-cuenta-colombia-96-esta-en-mal-estado-2828335>
- [2] E. C. Jiménez y H. M. Garcia, “Aprovechamiento de los RCD en proyectos de construcción y conservación de pavimentos urbanos”, Tesis de especialización, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogota, 2016. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3424997>
- [3] M. Arshad, “Development of a Correlation between the Resilient Modulus and CBR Value for Granular Blends Containing Natural Aggregates and RAP/RCA Materials”, *Hindawi*. <https://www.hindawi.com/journals/amse/2019/8238904/>
- [4] J. A. Marin, “Análisis de la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) en un proyecto institucional”, Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Santiago de Cali, 2019. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/38336>
- [5] D. X. Xuan, A. A. Molenaar y L. J. Houben., “Evaluation of Cement Treatment of Reclaimed Construction and Demolition Waste as Road Bases”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 100, pp. 77-83, Ago., 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.033>
- [6] F. Colangelo, A. Petrillo, R. Cioffi, C. Borrelli y A. Forcina, “Life Cycle Assessment of Recycled Concretes: a Case Study in Southern Italy”, *Science of the Total Environment*, vol. 615, pp. 1506–1517, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.107>

- [7] V. W. Tam, "Recovery of Construction and Demolition Wastes", *Handbook of Recycling*, 2014, pp. 385-396. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00024-6>
- [8] A. F. Cabalar, D. I. Hassan y M. D. Abdulnaffaa, "Use of Waste Ceramic Tiles for Road Pavement Subgrade", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, n. ° 4, pp. 882-896, Jun., 2016.
- [9] A. F. Cabalar, O. A. Zardikawi y M. D. Abdulnaffaa, "Utilisation of Construction and Demolition Materials with Clay for Road Pavement Subgrade", *Road Materials and Pavement Design*, Mar., 2017. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1407817>
- [10] A. Arisha, A. Gabr, S. El-Badawy y S. Shwally, "Using Blends of Construction & Demolition Waste Materials and Recycled Clay Masonry Brick in Pavement" *Procedia Engineering*, vol. 143, pp. 1317-1324, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.148>
- [11] D. Kong y J. G. Sanjayan, "Damage Behavior of Geopolymer Composites Exposed Tto Elevated Temperatures", *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, n. ° 10, pp. 986-991, Nov., 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.08.001>
- [12] R. A. Robayo-Salazar, J. M. Mejía-Arcila y R. Mejía de Gutierrez, "Eco-Efficient Alkali-Activated Cement Based on Red Clay Brick Wastes Suitable for The Manufacturing of Building Materials", *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, pp. 242-252, Nov., 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.243>
- [13] D. X. Xuan, E. Schlangen, A. A. Molenaar, y L. J. Jouben, "Influence of Quality And Variation of Recycled Masonry Aggregates on Failure Behavior of Cement Treated Demolition Waste", *Construction and Building Materials*, vol. 71, pp. 521-527, Nov., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.079>
- [14] G. T. Mehrjardi, A. Azizi, A. Haji-Azizi y G. Asdollafardi, "Evaluating and Improving the Construction and Demolition Waste Technical Properties to Use in Road Construction", *Transportation Geotechnics*, n. ° 23, pp. 100349, Jun., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100349>
- [15] M. Saberian, J. Li, M. Boroujeni, D. Law y C.Q. Li, "Application of Demolition Wastes Mixed with Crushed Glass and Crumb Rubber in Pavement Base/Subbase", *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 156, pp. 104722, May., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104722>
- [16] A. C. G. A. J. F. P. Balaguera, "Life Cycle Assessment of Road Construction Alternative Materials: a Literature Review", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 132, pp. 37-48, May., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.003>
- [17] D. A. a. T. F. Chowdhury, "A Life Cycle Based Enviromental Impacts Assesment of Construction Materials Used in Road Construction", *Resoruces conserv Recycling*, vol. 54, n. ° 4, pp. 250-255, Feb., 2010. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>
- [18] C. Hidalgo, G. Carvajal y F. Muñoz, "Laboratory Evaluation of Finely Milled Brick Debris as a Soil Stabilizer", *Sustainability*, vol. 11, n. ° 4, pp. 967, Feb., 2019. <https://doi.org/10.3390/su11040967>

- [19] K. Hossain, M. Lachemi y S. Easa, “Stabilized Soils for Construction Applications Incorporating Natural Resources of Papua New Guinea”, *Resources, conservation and recycling*, vol. 51, pp. 711-731, Oct., 2007. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.003>
- [20] D. Qiao, J. Qian, Q. Wang, Y. Dang, H. Zhang y D. Zenga, “Utilization of Sulfate-Rich Solid Wastes in Rural Road Construction in The Three Gorges Reservoir”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, n. ° 12, pp. 1368-1376, Oct., 2010. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.05.013>
- [21] C. S. Poon y D. Chan, “Feasible Use of Recycled Concrete Aggregates and Crushed Clay Brick as Unbound Road Sub-Base”, *Construction and Building Materials*, vol. 20, n. ° 8, pp. 578-585, Oct., 2006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045>
- [22] A. Arulrajah, M. Disfani, S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong y N. Prongmanee, “Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications”, *Construction and Building Materials*, vol. 58, pp. 246-256, May., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.025>
- [23] S. Pourkhorshidi, C. Sangiorgi, D. Torreggiani y P. Tassinari, “Using Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Unbound Layers of Pavements”, *Sustainability*, vol. 12, n. ° 22, p. 9386, Nov., 2020. <https://doi.org/10.3390/su12229386>
- [24] A. Barbudo, F. Agrela, J. Ayuso, J. R. Jiménez y C. S. Poon, “Statistical Analysis of Recycled Aggregates Derived from Different Sources for Sub-Base Applications”, *Construction and Building Materials*, vol. 28, n. ° 1, pp. 129-138, Mar., 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035>
- [25] Universidad de Medellín, “Optimización de materias primas y su uso en proyectos de construcción. Caso de estudio obra Guayacanes del Sur” Universidad de Medellin, Medellin, 2018.
- [26] F. Reyes, “CEDEM. Programa para cálculo de esfuerzos y deformaciones”, Bogotá, 2003.
- [27] Departamento Administrativo de Planeación_1, “Temperatura promedio anual en los municipios de Antioquia”, 2016.
- [28] Departamento Administrativo de Planeación_2, “Precipitación promedio anual, por subregiones y municipios”, 2016.
- [29] A. Montejo, “Dimensionamiento de las estructuras del pavimento”, *Ingeniería de pavimentos para carreteras*, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2002, pp. 205-228.
- [30] H. A. Rondon y F. A. Reyes, *Pavimentos, materiales, construccion y diseño*, Bogota: Ecoe Ediciones, 2015.
- [31] INVIAS_2, *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito*. Instituto Nacional de Vías (INVIAS), Popayan: Ministerio de Transporte, 1998.
- [32] F. Sanchez y S. X. Campagnoli, *Pavimentos Asfálticos de Carreteras. Guía Practica Para los Estudios y Diseño*, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2016.

- [33] INVIAS_1, *Guía metodológica para diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. Segunda edición. Bogotá: Instituto Nacional de Vías (INVIAS), Ministerio de Transporte, 2008.
- [34] A. M. Castrillón-Rodríguez, *Evaluación del desempeño de mezclas de suelos con residuos de construcción y demolición (RCD), para el mejoramiento de subrasantes de vías de bajo volumen de tránsito*, Medellín: Universidad de Medellín, 2022.
- [35] ITOMAK, “ITOMAK Latinoamerica. Equipos y tecnología limpia”, 2021. [En línea]. <http://itomakla.com/descubra-mas/convertidor-de-toneladas-a-metros-cubicos-t-a-m3/>
- [36] J. A, Lauren, “Optimización del proceso de trituración de agregados pétreos para la producción de mezclas asfálticas en caliente”, Tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Uni. Andes, Bogotá, 2008. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/9808>