

TRABAJO DE GRADO
Opción Investigación o Proyecto de Grado

**VIABILIDAD DEL USO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN MEZCLADOS CON
MATERIALES FINOS Y GRANULARES PARA DESTINOS DE RELLENOS
ESTRUCTURALES (SUELOS) Y VÍAS DE TRÁNSITO SECUNDARIAS Y
TERCIARIAS.**

Corporación Universitaria Remington.
Facultad de ingeniería.
Ingeniería civil.

Angie Yuliana Gallego Ramírez
Jhon Jairo Garcés Posada
Alexander Zuleta Durango
Investigación.
2024

Dedicatoria

queremos dedicar este trabajo de investigación con mucho cariño a nuestra familia. Sin su amor incondicional, apoyo constante y comprensión, ninguno de estos logros habría sido posible. Ellos han sido la base que nos ha sostenido en cada paso, con palabras de ánimo y una entrega que siempre nos motiva a seguir adelante.

Agradecimientos

También queremos expresar nuestro agradecimiento al profesor Alexander Zuleta Durango, quien ha sido nos ha brindado un apoyo y acompañamiento en este proceso. Su experiencia, paciencia y esfuerzo nos guio durante toda la etapa de la investigación. Su enfoque riguroso y su amplio conocimiento del tema nos brindó una dirección clara, constante y efectiva, ayudándonos a explorar aspectos de investigación y redacción que no habíamos considerado. Gracias a sus consejos, y asesoramiento, comprendimos mejor la idea de estudio que deseamos desarrollar, además de reconocer y asesorarnos a la hora de aplicar nuestras habilidades para afrontar la etapa investigativa con mayor seguridad.

Por último, queremos dar las gracias a la empresa Suelos & Suelos YM por su apoyo asesoramiento, apoyo y seguimiento en esta investigación. La actitud, el apoyo y el profesionalismo de su equipo fueron fundamentales para poder realizar los ensayos y recopilar datos.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	7
Palabras clave	9
Introducción	10
Planteamiento del problema	12
Antecedentes	14
Objetivos	20
Objetivo General	20
Objetivos Específicos	20
Metodología	21
Desarrollo	27
Relleno estructural	28
Procedimiento y ensayos	28
Sub-base granular	31
Procedimiento y ensayos	36
Análisis de mezclas	36
Relleno estructural - resultados	36
- Mezcla #1 (relación 70% - 30%)	36
- Mezcla #2 (relación 50% - 50%)	37
- Mezcla #3 (relación 30% - 70%)	39
- Mezcla #4 (relación 20% - 80%)	40
Sub-base granular – resultados	42
- Mezcla #1 (relación 40% - 60%)	42
- Mezcla #2 (relación 50% - 50%)	44
- Mezcla #3 (relación 60% - 40%)	44
- Mezcla #4 (relación 70% - 30%)	45
Conclusiones	51
REFERENCIAS	53

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Metodología Relleno estructural y Subbase granular</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2. 610-1. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. 320-1. Requisitos de los agregados para sub-bases granulares.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4. Categorías de tránsito para la selección de espesores</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 5. Proporción 70% Material de cantera - 30% Material RCD.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 6. Proporción 50% Material de cantera - 50% Material RCD.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 7. Proporción 30% Material de cantera - 70% Material RCD.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 8. Proporción 20% Material de cantera - 80% Material RCD.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 9. CBR de laboratorio, mínimo (%) (A≥10) (B≥5) (C≥3)</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 10. Proporción 40% Material de cantera - 60% Material RCD.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 11. Proporción 50% Material de cantera - 50% Material RCD.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 12. Proporción 60% Material de cantera - 40% Material RCD.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 13. Proporción 70% Material de cantera - 30% Material RCD.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 14. Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) ≤12 -Sulfato de sodio</i>	<i>50</i>

Lista de ilustraciones

<i>Ilustración 1. CBR de laboratorio</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 2. CBR (%) porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 3. Resultados Relleno estructural, 4 Mezclas, 4 Proporciones.....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 4. Sub-base Granular 4 Mezclas, 4 Proporciones.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 5. Pérdidas en ensayo de solidez sulfato de sodio $\leq 12\%$</i>	<i>50</i>

Resumen

En el desarrollo de este trabajo investigativo se pretende evaluar el cumplimiento de los materiales grueso granulares y fino granulares mezclados con residuos de materiales obtenidos en demoliciones para su posterior utilización en construcción de vías de tránsito secundario, terciario y rellenos, estos materiales se rigieron a parámetros definidos y establecidos por el Instituto Nacional de Vías de Colombia - INVÍAS (INVÍAS, 2022) bajo la normativa descrita en los artículos 320 y 610 (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013) (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013) (INVÍAS Art.320, 2013), que clasifican materiales como sub bases granulares y llenos estructurales aptos para uso, distribución y venta, en toda el área de la construcción mencionada anteriormente.

En este trabajo se presentan tres diferentes etapas donde se desarrolló la investigación las cuales son; descripción y contexto de la investigación, fase experimental, y finalmente, el análisis y discusión de los resultados.

En la descripción y contexto se presenta toda la información recolectada con base en la revisión bibliográfica, así como información sobre usos, aplicaciones, antecedentes y normatividad asociada. Los ensayos y análisis que se realizaron con herramientas y equipos de laboratorio analizando las proporciones de materiales de demolición con su respectiva mezcla con materiales como suelo, afirmado, sub-base y base granular, para la verificación del cumplimiento de los requisitos de los materiales con base en artículos entregados por INVÍAS (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013) (INVÍAS Art.320, 2013) donde se llevaron a cabo ensayos como lo son clasificación (plasticidad y granulometría), Proctor modificado, relación de soporte del suelo en el laboratorio, porcentaje de caras fracturadas

e índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados (Romero Y. & Pulido C, 2019), determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados, equivalente de arena de suelo, agregados finos, clasificación de la fracción fina de un suelo a partir de su valor azul de metileno, desgaste en la máquina de los ángeles (Gomez, 2018), evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10% de finos, degradación por abrasión en el aparato Micro – Deval, angularidad del agregado fino, y sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o magnesio (INVÍAS- Documentos técnicos, 2013). Finalmente se evaluaron los resultados de cada ensayo descrito en los artículos 320 y 610 de INVÍAS (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013) (INVÍAS Art.320, 2013) y se compararon con los requisitos normativos establecidos, permitiendo así determinar la viabilidad del uso de materiales de demolición en mezclas para su aplicación en infraestructura vial.

Palabras clave

(Relleno, Sub-base, RCD, INVIAS, cantera)

Introducción

En Colombia, lidiar con los residuos de construcción y demolición (RCD) no es un proceso fácil. La infraestructura, desarrollo y recursos no tienen un plan de desarrollo para recogerlos, transportarlos, almacenarlos y tratarlos de manera adecuada, y eso lleva a que muchas veces se dispongan de manera inadecuada, por las personas locales, lo que termina dañando el entorno natural, afectando la salud y retrasando el desarrollo de las ciudades.

La acumulación de escombros y residuos de construcción y demolición (RCD) en zonas urbanas y alrededores puede poner en riesgo la salud de las personas. Esto puede ser por accidentes, la proliferación de insectos y otros vectores de enfermedades, o por la emisión de polvo y partículas que afectan la calidad del aire. En varias ciudades del país, la disposición ilegal de estos residuos también genera problemas, ya que ocupa espacios públicos de forma irregular, lo que dificulta la planificación urbana y el aprovechamiento adecuado del suelo.

En pleno proceso de crecimiento rápido de las ciudades y con la búsqueda de un desarrollo que sea más sostenible, gestionar los residuos de construcción y demolición (RCD) se ha convertido en uno de los principales desafíos para nuestras sociedades hoy en día. Estos residuos representan una parte importante de los desechos sólidos urbanos y generan problemas en torno a lo ambiental, lo económico y lo social. Sin embargo, reciclar y reutilizar materiales provenientes de los RCD surge como una opción muy prometedora para hacer frente a este escenario complejo (Renovables.blog, 2023).

Aprovechar estos materiales no solo mitiga el impacto ambiental asociado a su disposición convencional, sino que también genera beneficios económicos al reducir los

costos relacionados con la adquisición de materias primas y el manejo de residuos contaminantes. Además, fomenta prácticas de construcción más sostenibles al preservar la energía y los recursos naturales.

Este trabajo investigativo analiza casos de estudio, como lo son destinos de relleno estructural y sub-base granular donde se evalúan los beneficios ambientales y económicos de la reutilización de materiales de RCD y se discuten los desafíos y obstáculos que enfrenta la práctica actual. Idealizar un futuro donde la reutilización materiales de residuos de construcción y demolición (RCD) puede ser parte fundamental para hacer nuestras construcciones más sostenibles y resistentes.

Usar directamente estos materiales en nuevas construcciones o en trabajos de renovación ya es posible, y muchas técnicas y aplicaciones de reciclaje en todo el mundo están ayudando a que esto sea una realidad. Por ejemplo, se pueden aprovechar ladrillos, bloques de concreto y vigas de madera que se recuperan de estructuras que ya no se usan, y volver a incorporarlos en nuevas obras de construcción. En particular, para la elaboración de nuevo concreto, es posible triturar el material recuperado de edificaciones demolidas y emplearlo como agregado en la mezcla, promoviendo así una gestión más sostenible de los recursos. Además de reducir la cantidad de desechos enviados al vertedero, este proceso reduce la necesidad de extraer nuevos áridos naturales (EPM, 2022).

Planteamiento del problema.

Actualmente, en Colombia existe una problemática con la disposición ilegal de residuos de construcción y demolición, dado a que se depositan clandestinamente sin el tratamiento adecuado para la disminución del impacto ambiental. La gestión inadecuada de estos desechos conduce a la disposición y acumulación irregular en áreas urbanas y rurales, lo que provoca la contaminación del suelo y el agua (INVÍAS, 2022). La falta de infraestructura adecuada para la recolección, transporte y tratamiento de RCD agrava esta problemática, lo que dificulta la implementación efectiva de políticas de gestión integral de residuos y compromete los esfuerzos para alcanzar una economía circular y sostenible en el sector de la construcción del país.

Hoy se conocen dos empresas (Greco y Dromos Pavimentos S.A.S.) que comercializan materiales para la construcción reciclados a base de RCD, por tratarse de temas comerciales y de competencia estas empresas no presentan abiertamente los ensayos bajo la norma INV E, procedimientos y estándares bajo los cuales se producen estos materiales y las normas que cumplen para su uso, comercialización y distribución (Quintero, 2022) (Sanchez, 2022).

Por esta razón, este trabajo de investigación busca marcar un antecedente académico e investigativo frente al desarrollo normativo y cumplimiento de estándares para el uso de RCD en la aplicación de relleno estructural – suelos. Además, adherirse a la resolución 472 del año 2017 que reglamenta la gestión integral de residuos generados en las actividades de construcción y demolición (RCD), al artículo 9 del capítulo 2

(aprovechamiento) donde se dan las pautas para la recepción y pesaje, separación y almacenamiento por tipo de RCD aprovechables, aprovechamiento y almacenamiento. Cabe aclarar que la adherencia del artículo 472 (Ministerio de Minas y Energía, 2005) a esta investigación no será de estricto cumplimiento debido a que esta se desarrollará en una escala muy pequeña, y se recomienda llevarla en obligatorio cumplimiento si se desea continuar con la investigación a gran escala de producción, distribución (INVÍAS- Documentos técnicos, 2013) y distribución de estos materiales reciclados en proyectos de infraestructura vial y otras aplicaciones constructivas, asegurando así su correcta gestión y cumplimiento normativo.

Antecedentes

En Colombia, la historia del manejo de desechos de construcción y demolición (RCD) demuestra un creciente reconocimiento de la necesidad de manejar estos materiales de manera adecuada para reducir los efectos negativos en el medio ambiente y fomentar prácticas sostenibles en el sector de la construcción. En las últimas décadas, se han realizado numerosos avances importantes como:

- Regulación y estándares: en Colombia, se han establecido normas y regulaciones para la gestión de RCD desde la década de 1990. La resolución 181920 de 2005 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece pautas para el manejo completo de estos desechos, que incluyen la recolección, el transporte, el almacenamiento y la disposición final.

- Investigaciones y estudios técnicos: varios investigadores han realizado estudios sobre la composición de los RCD en Colombia, sus efectos en el medio ambiente y las formas de reciclar y reutilizar estos materiales en la edificación. Estos estudios han contribuido a la divulgación de políticas públicas y estrategias de gestión (EPM, 2022).

- Proyectos locales y regionales: se han llevado a cabo programas piloto y proyectos para la recuperación y reciclaje de RCD en varias ciudades y regiones del país. Estos proyectos han servido como modelos para la creación de políticas nacionales más amplias (EPM, 2022).

- Participación de la industria privada: el uso de materiales reciclados de RCD es uno de los primeros pasos que han tomado las empresas del sector de la construcción hacia

prácticas de construcción sostenible. Esto ha ayudado a establecer buenas prácticas y estándares voluntarios en el sector (EPM, 2022).

- Educación y concientización: se ha hecho un gran esfuerzo para formar a los educadores sobre la importancia de manejar correctamente los RCD, y los beneficios del reciclaje y la reutilización de estos materiales. Esto incluye cursos destinados a arquitectos, constructores y funcionarios públicos (EPM, 2022).

A pesar de los obstáculos en la infraestructura, el cumplimiento normativo y la cultura de manejo adecuado de los residuos en todos los niveles de la sociedad, estos antecedentes muestran un avance gradual hacia una gestión más integral y sostenible de los residuos de construcción y demolición en Colombia (Ministerio de Minas y Energía, 2005). Documentos referentes a los usos que se le están dando actualmente a los residuos de construcción y demolición (RCD), donde se encuentra que los trabajos de investigación son:

- En el trabajo realizado por Ramos, B., & Rosso se utilizaron agregados reciclados de partículas finas procesados por la empresa CICLO, se mezclaron con el suelo arenoso natural en proporciones del 10% y 20%. Se evaluó la capacidad de carga admisible del suelo mediante las teorías de Terzaghi y de capacidad de carga para suelos estratificados. Los resultados muestran que el suelo tratado con residuos de construcción y demolición (RCD) puede soportar cargas superiores a las necesarias para construir una casa de dos pisos. Sus valores estuvieron entre 1.36 kg/cm² y 1.38 kg/cm², sin presentar problemas por asentamientos, lo que indica que agregar RCD a la tierra arenosa en Ancón mejora mucho

las condiciones para las bases de las construcciones, garantizando tanto su estabilidad como la seguridad de quienes las habitan. (Ramos B & Rosso, 2023).

- Según Paz et al. (2022), esta investigación se centró en recopilar, analizar y comparar diferentes estudios, tesis y documentos relacionados con los residuos de construcción y demolición. La idea principal fue explorar distintas formas de usar RCD en componentes estructurales y decorativos, considerando también el impacto que estos residuos generan en lugares como Colombia, especialmente en el municipio de Ocaña, Norte de Santander (Paz Morales & Quintero García, 2022).

- El documento del Circular Innovation Council (2022) presenta diversas estrategias para aumentar las intenciones de la reutilización de RCD. Se subraya la relevancia de aprovechar estos materiales, para un cambio ambiental y presentar una mayor conciencia colectiva de depositario, ya que su reutilización disminuye el impacto ambiental. (Circular Innovation Council, 2022).

- Destaca lo importante que es reutilizar estos materiales para reducir el impacto en el medio ambiente, fomentar la sostenibilidad y mejorar nuestro entorno. Además, el estudio de Vieira y Pereira (2015) resalta las ventajas de usar materiales reciclados de residuos de construcción y demolición en proyectos de ingeniería geotécnica, Específicamente, señalan que son útiles en capas base y subbase de pavimentos, así como como relleno en estructuras reforzadas con geosintéticos, demostrando que son una opción técnica viable para obras viales. (C. S. Vieira & P. M. Pereira, 2015). Investigaciones similares, como las de Tavira y Jiménez (2018) y Rodríguez R. (2021), Expresan el mismo punto de partida, donde se evidencia que ambos tienen el mismo interés. De manera similar,

los trabajos de Silva et al. (2022) y Arcila Castro & Silva Urrego (2022) muestran mediante procedimientos, resultados y conclusiones que es factible usar agregados reciclados en construcción siempre y cuando se adhieran a la norma vigente (A Silva & Q Delgado, 2022).

- Silva et al. señalan que, aunque estos materiales cumplen con las normativas, su desempeño mejora mucho cuando se tamizan, ya que así se logra una distribución más homogénea y se reduce la variabilidad que puede estar relacionada con el tipo de obra o las condiciones climáticas. Investigaciones como las de Crucho, Santos y Neves (2021), así como Silva y Delgado (2022), respaldan estos hallazgos, confirmando la necesidad de tratamientos específicos para garantizar el rendimiento óptimo de los agregados reciclados. (J Crucho. L P Santos & J Neves, 2021) y (A Silva & Q Delgado, 2022).

Por su parte, Arcila Castro y Silva Urrego (2022) analizaron el efecto de los distintos tratamientos aplicados a los agregados reciclados influyen en las propiedades del concreto autocompactante. Encontraron que la presencia de mortero adherido reducía su desempeño, pero al someterlos a desgaste mecánico o inmersión en solución ácida, se mejoró su resistencia a la compresión y se redujo la porosidad hasta en un 6,06%, favoreciendo su durabilidad. Ambos estudios coinciden en que, con las modificaciones adecuadas, los residuos reciclados pueden convertirse en una alternativa técnica y ambientalmente sostenible para la construcción.

- El artículo de Roa, C. C. R. y Porras, L. J. R., Muestra interés por la Investigación de los factores de utilización del RCD en el área de mejoramiento de suelo para la utilización en ingeniería civil. La investigación demuestra que los materiales mejoran las

propiedades mecánicas de los suelos, haciendo que tengan mejor capacidad portante y resistentes para su aplicación. Los resultados indican que al incorporar RCD en proporciones del 10% y 20%, se mejora la capacidad de carga del suelo, alcanzando valores superiores a los requeridos para cimentaciones que varían los dependiendo de la capacidad portante del suelo y la cimentación a construir entre un 5% y un 10%. Concretamente, el suelo reforzado con RCD mostró una capacidad de carga admisible que superó la carga actuante necesaria para edificaciones, evidenciando una solución efectiva y sostenible para la mejora de suelos en proyectos de construcción (Roa - C. C. & Porras, 2019). Al igual que el artículo publicado por Ayuso et al. (2018). quienes abordan una metodología muy similar al uso y aplicación del mismo material en el año 2018 (Ayuso et al, 2018) y se replicó en el año 2020 (A. López-Uceda et, 2020).

- En el caso del trabajo investigativo (Roa - C. C. & Porras, 2019) donde se evaluaron ensayos de campo de vías ya construidas con una mezcla de materiales base, sub-base y residuos de construcción y demolición, se observa que el comportamiento del material con mezclas ya existentes, donde se realizaron pruebas de relación de soporte del suelo de muestra inalterada (CBR Inalterado) INV E – 148, clasificación (límites de Atterberg, índice de plasticidad y granulometría INV E – 125, 126 y 213) y peso unitario del suelo en el terreno método del cono de arena INV E – 161 (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013). Mostró que la mezcla de materiales base, sub-base y residuos de construcción y demolición no cumplió con los requisitos técnicos exigidos para vías de tránsito secundario. Estos ensayos mencionados anteriormente descartan los materiales de base y sub-base para carreteras de vías de tránsito secundario, dado a que se presentó un deterioro en la vía y los

ensayos no cumplieron los requisitos solicitados en el artículo 610 y 320 (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013) (INVÍAS Art.320, 2013) es de resaltar que el desarrollo de la construcción de una vía debe cumplir con el requisito de tener un espesor superior a cien milímetros (100 mm) e inferior a doscientos milímetros (200 mm) para la compactación de las capas de base y sub-base granular, procediendo con su respectiva capa de rodadura o revestimiento asfáltico (INVÍAS, 2022). Para el relleno estructural, este puede aplicar para seis destinos diferentes como se describen a continuación: suelos, recibos, materiales granulares tipo SBG y BG, material granular filtrante y gravilla que deben cumplir con los requisitos del artículo 610 (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013).

Objetivos

Objetivo General

Determinar si las mezclas de los materiales seleccionados son aptas para la utilización en rellenos estructurales y en la construcción de vías de tránsito secundario y terciario.

Objetivos Específicos

Estudiar el comportamiento mecánico de los agregados mezclados con material de demolición para su aplicación en los destinos como subbase granular y relleno estructural para aplicaciones en vías de tránsito secundarias y terciarias.

Validar la conformidad de las mezclas de subbase granular y relleno estructural mezclados con material de demolición con respecto a los artículos 320 y 610 de la norma INV E-13.

Determinar la composición, características físicas y mecánicas de los residuos de construcción y demolición generados en una región específica de Colombia al ser mezclados con material de cantera.

Investigar y proponer métodos innovadores para el reciclaje y la reutilización de materiales de RCD, con un enfoque en su aplicación en la construcción de infraestructura como carreteras, rellenos de terrenos y aceras.

Metodología

En primer lugar es importante mencionar que este trabajo es de tipo investigativo, pero adicionalmente busca ayudar a solucionar el problema de los desechos de materiales de demolición contribuyendo a la reducción de residuos y presentando una opción más sostenible con el medio ambiente por medio de la utilización de los desechos de demolición de construcción mezclados en diferentes proporciones con materiales fino granulares y grueso granulares para su posterior uso en el área de ingeniería civil, como base granular, subbase granular y rellenos estructurales.

Estos materiales se rigen bajo una normativa que se puede encontrar en la página del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022), donde se presentan una serie de artículos para todas las aplicaciones de suelos en el área de la construcción, y entre ellos están los artículos 320 subbase granular (INVÍAS Art.320, 2013) y 610 rellenos para estructuras (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013), todos estos destinos deberán satisfacer los requisitos de calidad indicados en los artículos para su correcto uso, distribución y aplicación.

Fueron recolectados materiales de demolición en una obra del barrio París en Bello – Antioquia, donde luego se trasladaron hasta las instalaciones del laboratorio de suelos (Suelos Y&M) para pasarlos por un proceso de trituración manual y posterior clasificación por tamaños de partículas por medio de tamizado manual. Posteriormente, se recolectaron los materiales de subbase granular y relleno estructural en la cantera Agregados Copacabana, ubicado en el municipio de Copacabana - Antioquia y se llevaron igualmente

al laboratorio de suelos (Suelos Y&M) donde se realizó el cuarteo del material como lo indica la norma INV E-104 (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

Dado que los dos materiales mencionados anteriormente para su respectivo estudio y posterior análisis contienen los mismos requisitos y estos a su vez están relacionados con las normas INV E-13 (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013), se conservó la misma metodología experimental, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Metodología Relleno estructural y Subbase granular

Característica	Norma INVE	Relleno Estructural	Subbase granular
Toma de muestras inalteradas de suelo en superficie.	104 - 13	X	X
Determinación del contenido de materia orgánica.	121 - 13	X	
Determinación del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.	122 - 13	X	X
Determinación del límite líquido de los suelos.	125 - 13	X	X
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.	126 - 13	X	X
Equivalente de arena de suelos y agregados finos.	133 - 13		X
Relaciones de humedad - peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación).	142 - 13	X	X
CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.	148 - 13	X	X
Medida del potencial de colapso de un suelo parcialmente saturado.	157 - 13	X	
Determinación del contenido de sales solubles en los suelos.	158 - 13	X	
Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados.	211 - 13		X
Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino.	213 - 13	X	X
Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles.	218 - 13		X
Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾") por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles.	219 - 13		X
Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.	220 - 13		X
Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato micro-deval.	238 - 13		X

Los requisitos solicitados en el artículo 610 2.1 para relleno estructural (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013) se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. 610-1. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras

ARTICULO 610-1. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras	
Característica	Norma INV
Porcentaje que pasa el tamiz de 2mm (N10) en masa. Máximo ≤ 80	E - 123
Porcentaje que pasa el tamiz de 75 μ m (N200) en masa. Máximo (A \leq 25) (B \leq 35)	E - 123
Contenido de materia orgánica, máximo (%) (A \leq 0) (B \leq 1) (C \leq 1)	E - 121
Limite líquido, máximo (%) (A \leq 30) (B \leq 40) (C \leq 40)	E - 125
Índice de plasticidad, máximo (%) (A \leq 10) (B \leq 15)	E - 126
CBR de laboratorio, mínimo (%) (A \geq 10) (B \geq 5) (C \geq 3)	E - 148
Expansión en prueba CBR, máximo (%) (A \leq 0) (B \leq 2) (C \leq 2)	E - 148
Índice de colapso, Máximo 2,0 (%)	E - 157
Contenido de sales solubles, máximo 0,2 (%)	E - 158

Los requisitos solicitados en los en los articulo 320 para sub-base granular (INVÍAS Art.320, 2013) se encuentran en Tabla 3.

Tabla 3. 320-1. Requisitos de los agregados para sub-bases granulares.

ARTICULO 320-1. Requisitos de los agregados para sub-bases granulares.	
Característica	Norma INV
DUREZA	
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) ≤ 50 - 500 revoluciones (%)	E - 118
Degradación por abrasión por el aparato de Micro-Deval, máximo (%) (B \leq 35) (A \leq 30)	E - 238
DURABILIDAD	
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) ≤ 12 -Sulfato de sodio	E - 220
LIMPIEZA (F)	
Límite líquido, máximo (%) ≤ 25	E - 215
Índice de plasticidad, máximo (%) ≤ 6	E - 125 Y E - 126
Equivalente de arena, mínimo (%) ≤ 25	E - 133
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%) ≤ 2	E - 211
RESISTENCIA DEL MATERIAL (F)	
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo. (C \geq 30) (B \geq 30) (A \geq 40)	E-148

En la Tabla 4, se presentan los requisitos del artículo 320 enfocadas a las categorías de tránsito (INVÍAS Art.320, 2013) donde se especifican que las conformidades deben ser para el uso típico de las diferentes clases de sub-base granular.

Tabla 4. Categorías de tránsito para la selección de espesores

Categorías de tránsito para la selección de espesores			
Categoría	Tipo de vía	TPDs	Ejes acumulados de 8.2t
T_0	(Vt) – (E)	0 a 200	< 1000000
T_1	(Vs) – (M ó A) – (CC)	201 a 500	1000000 a 5000000
T_2	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	501 a 1000	5000000 a 9000000
T_3	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	1001 a 2500	9000000 a 17000000

En la Tabla 4 las siglas tienen el siguiente significado.

Vt: Vía terciaria - Vs: Vía secundaria - Vp: Vía principal - E: Estrechas

M: Medias A: Anchas - CC: Carreteras de 2 direcciones - MC: Carreteras

multicarriles - AP: Autopistas – TPDs: Teoría de placas y deformaciones

solidas (INVÍAS, 2022).

Desarrollo

Es fundamental continuar perfeccionando y proponiendo nuevas metodologías para implementar prácticas efectivas de reciclaje, disposición y puntos de depositarios, informando sobre reutilización de RCD, cambiando la mentalidad de la sociedad y mostrando los veneficios para todas las regiones de en Colombia. Teniendo en cuenta, que buscar nuevas propuestas que se adapten al enfoque de mejoramiento de suelo, para su posterior uso, distribución, mejorando la resistencia inicial y posteriormente disminuir el precio de venta. Para esto, es necesario conocer en detalle qué tipos de RCD se generan en cada región, identificando su composición física y química, y también cuáles de estos materiales pueden volver a usarse en nuevas construcciones. Sin dejar de lado que hay que atender aspectos técnicos importantes, como la trituración controlada de materiales pétreos. Si funcionan las estrategias planteadas en este documento, como en otros documentos mencionados no solo se reduce la cantidad de residuos que terminan en los rellenos sanitarios, sino que también disminuiría el impacto en el medio ambiente, evitando la sobreexplotación de recursos naturales y la producción de insumos tradicionales. La idea es promover una cultura de economía circular en el sector de la construcción, fomentando prácticas sostenibles y un uso más eficiente de los recursos en Colombia.

Relleno estructural

En esta investigación, se inició la parte experimental por relleno estructural, donde se definieron las proporciones de 30 - 70, 50 - 50, 20 - 80 y 70 - 30 de material de cantera (agregados) y material de RCD respectivamente para su posterior estudio y análisis del comportamiento frente a la normativa (INVÍAS, 2022) y la decisión de las proporciones se apoyó en el artículo (Roa - C. C. & Porras, 2019). Con base en esta distribución de materiales, se determinó el siguiente planteamiento experimental y de ensayos:

Procedimiento y ensayos

- I.** Inicialmente, se procedió a la dosificación del material necesario para cada una de las mezclas propuestas.
- II. Toma de muestras inalteradas de suelo en superficie INV E – 104 – 13:** Este procedimiento manual se utilizó para reducir una muestra de suelo a una parte más pequeña y manejable, que pudiera analizarse en laboratorio. Consiste en mezclar bien el suelo y luego dividir la muestra en cuatro partes iguales usando técnicas como el cuarteo en cruz, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).
- III. Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo -agregado INV E – 122 – 13:** En este procedimiento, se pesó una muestra de suelo en estado húmedo, luego se secó en un horno a una temperatura constante de 110 ± 5 °C hasta que alcanzó un peso constante. Tras enfriar la muestra, se volvió a pesar, y la diferencia entre el peso inicial y el peso final permitió calcular el porcentaje de humedad del suelo, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

- IV. Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 13:** Los límites se determinaron mediante ensayos de consistencia, como el ensayo de la cazuela de Casagrande para el límite líquido y el ensayo de cilindro para el límite plástico. Los resultados obtenidos permiten clasificar los suelos según su comportamiento bajo diferentes condiciones de humedad, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).
- V. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E – 126 – 13:** Este valor se obtiene mediante la resta de los resultados obtenidos en los ensayos de la norma INV E – 125 – 13, donde se determinan tanto los límites líquidos como los plásticos, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).
- VI. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E – 213 – 13:** Este procedimiento implica la separación de los agregados en diversas fracciones de tamaño mediante una serie de tamices con mallas de diferentes dimensiones. Se pesa la fracción retenida en cada tamiz y se calcula el porcentaje de cada fracción con respecto a la muestra total, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).
- VII. Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 13:** En este procedimiento se determinó la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo del suelo, al compactarlo en un molde bajo condiciones específicas. Se realizó en varios niveles de humedad por capa de suelo, con el fin de obtener una curva de compactación que muestra la variación de la densidad del suelo según su contenido de humedad, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

- VIII. CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV E – 148 – 13:** El ensayo de CBR se utiliza para medir la capacidad de un suelo para soportar cargas. Este ensayo se llevó a cabo mediante la compactación de muestras obtenidas en el ensayo INV E – 142 – 13 y luego se midió la resistencia al corte del suelo al aplicar una carga estándar utilizando un penetrómetro, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).
- IX. Medida del potencial de colapso de un suelo parcialmente saturado INV E – 157 – 13:** Este ensayo evaluó la capacidad del suelo para colapsar o cambiar de volumen cuando se somete a saturación completa. Se aplicó una carga y una humedad controlada para simular las condiciones de saturación y medir el colapso o asentamiento del suelo, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).
- X. Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición INV E – 121 – 13:** En este proceso, se pesa una muestra de suelo, que luego se calienta en un horno a 445 ± 10 °C durante seis horas para quemar los componentes orgánicos. Posteriormente, se pesa la muestra residual, y la diferencia de peso antes y después de la ignición se utiliza para determinar el contenido de materia orgánica en el suelo, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).
- XI. Determinación del contenido de sales solubles en los suelos INV E – 158 – 13:** Se preparó una solución de agua destilada, seguida de un proceso de filtración para separar el líquido de las partículas sólidas. La concentración de sales se midió en el filtrado utilizando métodos analíticos, como la conductividad eléctrica, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

Finalmente, se evaluaron los resultados obtenidos para determinar el cumplimiento de los parámetros definidos y establecidos por INVÍAS – Colombia, bajo la normatividad descrita en el artículo 610 (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013). Es preciso aclarar que se realizaron ensayos para 4 muestras las cuales fueron 40 - 60, 50 - 50, 60 - 40 y 70 - 30 correspondientes a los porcentajes de material de cantera y RCD respectivamente. De cada mezcla propuesta para estas proporciones, se llevaron a cabo 16 ensayos en total de relleno estructural, asegurando un análisis riguroso y detallado.

Sub-base granular

PROCEDIMIENTO Y ENSAYOS

Para este material se definieron las proporciones de 40% - 60%, 50% - 50%, 60% - 40% y 70% - 30% de material de cantera (Agregados) y material de RCD respectivamente para su posterior estudio y análisis del comportamiento frente a la normativa (INVÍAS, 2022) y la decisión de las proporciones se apoyó en el artículo (Roa - C. C. & Porras, 2019) y con base en esta distribución de materiales, se determinó el planteamiento experimental de ensayos relacionado anteriormente en la tabla 1, además de los criterios de procedimientos y ensayos descritos a continuación:

- I.** Primero, se procedió a la dosificación de los materiales necesarios para cada mezcla conforme a lo propuesto.
- II. Toma de muestras inalteradas de suelo en superficie INV E – 104 –13:**
Este procedimiento manual se empleó para reducir una muestra de suelo a un tamaño más pequeño y manejable, apto para su análisis en el laboratorio.

El proceso consiste en mezclar el suelo de manera homogénea y posteriormente dividir la muestra en cuatro partes iguales, utilizando técnicas como el cuarteo en cruz. Se seleccionaron dos de estas partes para formar una nueva muestra, repitiendo el proceso de ser necesario, asegurando que la muestra final fuera fiel al suelo original. Esta metodología garantiza que los resultados obtenidos en el laboratorio reflejen con exactitud las características del suelo, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

III. Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo -agregado INV E – 122 – 13:

Para determinar la humedad, se pesó una muestra de suelo, se secó en un horno a 110 ± 5 °C hasta que alcanzó peso constante, y luego se volvió a pesar. La diferencia entre el peso inicial y el peso final permitió calcular el porcentaje de humedad presente en el suelo, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

IV. Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 13: Los límites fueron obtenidos mediante ensayos de consistencia, como el ensayo con la copa de Casagrande para el límite líquido y el ensayo con cilindro para el límite plástico. Estos ensayos proporcionaron información útil para clasificar el suelo según su comportamiento en diferentes niveles de humedad, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

V. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E – 126 – 13:

El índice de plasticidad se calculó restando los resultados obtenidos en el ensayo de la norma INV E – 125 – 13, es decir, la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

VI. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E – 213 –

13: este procedimiento se separaron los agregados en diversas fracciones de tamaño mediante una serie de tamices con mallas de diferentes dimensiones. Posteriormente, se pesó la fracción retenida en cada tamiz y se calculó el porcentaje de cada una respecto a la muestra total, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

VII. Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 13:

Este ensayo determinó la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo del suelo al compactarlo en un molde bajo condiciones específicas. Se realizaron evaluaciones a diferentes niveles de humedad, permitiendo la construcción de una curva de compactación que muestra la variación de la densidad del suelo en función del contenido de humedad, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

VIII. CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra

inalterada INV E – 148 – 13: El ensayo de CBR mide la resistencia del suelo al corte, aplicando una carga estándar mediante un penetrómetro a los suelos compactados. Los resultados obtenidos de este ensayo, junto con los

del ensayo INV E – 142 – 13, se utilizaron para determinar la capacidad del suelo para soportar cargas, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

- IX. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznableles en los agregados INV E – 211 – 13:** En este proceso se separaron y evaluaron los terrones de arcilla y las partículas que se desintegran fácilmente cuando se exponen a humedad. La muestra de agregados se trató con agua para identificar y medir estas partículas no deseadas, las cuales pueden afectar negativamente la calidad y rendimiento de los materiales en la construcción, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).
- X. Equivalente de arena de suelos y agregados finos INV E – 133 – 13:** Este ensayo cuantificó las partículas finas y fracciones de arcilla en los suelos y agregados, comparándolos con una muestra estándar de arena. Utilizando un equipo específico, se evaluó la cantidad de material fino presente, proporcionando un índice que indica la proporción de partículas indeseables, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).
- XI. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio INV E – 220 – 13:** Los agregados se sumergieron en soluciones de sulfato de sodio, sometidos a ciclos alternados de secado y humedecimiento. Este ensayo tuvo como fin evaluar la resistencia de los agregados a la degradación y expansión provocadas por estos compuestos químicos, que simulan condiciones ambientales severas. Los resultados obtenidos permitieron determinar la durabilidad de los agregados y su

capacidad para mantener sus propiedades estructurales cuando están expuestos a sales, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

XII. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval INV E – 238 – 13:

Se expuso una muestra de agregado a un ciclo de abrasión en un tambor giratorio que contenía esferas de acero y agua. Este proceso de abrasión provocó el desgaste del material, y la cantidad de material fino generado se midió para evaluar su resistencia a la degradación, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

XIII. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles INV E – 218 –

13: En este ensayo, los agregados fueron colocados en un tambor rotatorio junto con esferas de acero y sometidos a un ciclo de abrasión. La cantidad de desgaste y la generación de partículas finas durante el proceso de abrasión se midió para evaluar la resistencia de los agregados a la degradación, (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013).

Finalmente, se evaluaron los resultados obtenidos para determinar el cumplimiento de los parámetros definidos y establecidos por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) – Colombia, bajo la normatividad descrita en el artículo 320. Es preciso aclarar que se realizaron ensayos para cuatro muestras, identificadas como 70 - 30, 50 - 50, 30 - 70 y 20 - 80, en proporciones de material de cantera y RCD respectivamente. Se realizaron las cuatro mezclas mencionadas anteriormente lo que resultó en un total de 16 ensayos de

subbase granular. Los resultados permitieron clasificar las mezclas, aceptándolas o rechazándolas según los parámetros técnicos y la capacidad de carga que exige la normativa vigente (INVÍAS Art.320, 2013). Este método ayuda a analizar cada combinación en detalle, asegurando que las propuestas cumplan con los estándares de calidad y rendimiento necesarios para su uso en proyectos de infraestructura vial.

Procedimiento y ensayos

Los resultados de los ensayos correspondientes a la segunda etapa de la investigación, la cual consta de la verificación del cumplimiento de los criterios establecidos en los artículos INVÍAS (INVÍAS, 2022), donde se rigen por las normas de la sección 100 y 200 (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013) de INVÍAS (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013).

Análisis de mezclas


Relleno estructural - resultados

Para rellenos estructurales por medio de ensayos de laboratorio, ver Tabla 2. Se logró determinar que de las cuatro proporciones de mezcla de agregados grueso y fino granulares con material de demolición de construcción con propuestas 70% - 30%, 50% - 50%, 30% - 70% y 20% - 80% respectivamente, solo se logra cumplir todos los criterios establecidos por la norma para suelos seleccionados, adecuados y tolerables en la mezcla #1 la cual contine una relación 70% - 30% de material de cantera y demolición respectivamente.

- **Mezcla #1 (relación 70% - 30%)**

Los ensayos de la mezcla #1(relación 70 - 30) presentaron un tamaño máximo nominal de ½”, arrojan conformidades de cumplimiento con los requisitos solicitados en el artículo 610 (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013), con valores dentro de los rangos solicitados por la norma a cada parámetro para suelos seleccionados, adecuados y tolerables presentado en la Tabla 5.

Tabla 5. Proporción 70% Material de cantera - 30% Material RCD



SUELOS & SUELOS YM

INGENIERÍA GEOTÉCNICA

TABLA RESUMEN 4 REPETICIONES DE LA PROPORCION 70% CANTERA - 30% RCD

Tabla 610 I. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras

CARACTERISTICA	NORMA INV E	RESULTADOS				A				B				C			
		SUELOS SELECCIONADOS				SUELOS ADECUADOS				SUELOS TOLERABLES							
		MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4
Porcentaje que pasa el tamiz de 2mm (N10) en masa. Máximo ≤80	E - 123	51,59	67,00	64,76	64,24	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Porcentaje que pasa el tamiz de 75µm (N200) en masa. Máximo (A≤25)(B≤35)	E - 123	12,98	22,49	16,76	13,65	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-
Contenido de materia Orgánica, máximo (%) (A≤0)(B≤1)(C≤1)	E - 121	0,00	0,00	0,00	0,00	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Limite liquido, máximo (%) (A≤30)(B≤40)(C≤40)	E - 125	24	28	17	23	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Índice de plasticidad, máximo (%) (A≤10)(B≤15)	E - 126	2	4	4	6	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-
CBR de laboratorio, mínimo (%) (A≥10) (B≥5) (C≥3)	E - 148	16,5	26,00	27,50	23,00	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Expansión en prueba CBR, máximo (%) (A≤0)(B≤2)(C≤2)	E - 148	0,00	0,00	0,00	0,00	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Índice de colapso, Máximo 2,0 (%)	E - 157	0,004	0,04	0,08	0,06	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Contenido de sales solubles, máximo 0,2 (%)	E - 158	0,158	0,14	0,14	0,14	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-

- **Mezcla #2 (relación 50% - 50%)**

Se descartó por el no cumplimiento de los criterios de contenido de materia orgánica (al tener suelos orgánicamente no actos provoca que estos puedan adsorber sustancias peligrosas como lo son los plaguicidas, cloro fenoles o cloro anilinas, presentaría

susceptibilidad a la erosión, baja compactación y altos grados de humedad en el suelo afectando así cualquier construcción), índice de colapso (los ensayos arrojaron índices de colapso alta, aunque la mayoría arrojan una conformidad de sí, se debe tener reserva con estos dado a que se encuentran con un grado de colapso ligero) y contenido de sales solubles (estos son suelos que contienen calcio, magnesio, sodio, cloruro, sulfato, bicarbonato, potasio, amonio, nitratos y carbonatos), estas sales reducen su vigor por la alteración de la toma de agua o la toxicidad por iones específicos provocando deterioro de las carreteras, edificios o construcciones, provoca zonas húmedas, encharcamientos, cambios de color por cristales de sal y se aumentan los niveles de agua en los surcos, siendo este último criterio repetitivo para los tres tipos de suelos establecidos seleccionados, adecuados y tolerables (Tabla 6).

Tabla 6. Proporción 50% Material de cantera - 50% Material RCD



Tabla 610 I. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras																	
TABLA RESUMEN 4 REPETICIONES DE LA PROPORCION 50% CANTERA - 50% RCD																	
Tabla 610 I. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras																	
CARACTERISTICA	NORMA INV	RESULTADOS				A				B				C			
		MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4
Porcentaje que pasa el tamiz de 2mm (N10) en masa. Máximo ≤80	E - 123	50,263	53,812	53,521	54,681	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Porcentaje que pasa el tamiz de 75µm (N200) en masa. Máximo (A≤25)(B≤35)	E - 123	18,409	21,009	19,437	20,898	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-
Contenido de materia Orgánica, máximo (%) (A≤0)(B≤1)(C≤1)	E - 121	0,002	0,504	0,207	0,120	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Límite líquido, máximo (%) (A≤30)(B≤40)(C≤40)	E - 125	27,397	23,933	25,517	28,116	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Índice de plasticidad, máximo (%) (A≤10)(B≤15)	E - 126	3,675	4,491	5,227	5,560	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-
CBR de laboratorio, mínimo (%) (A≥10) (B≥5) (C≥3)	E - 148	21,800	25,200	15,700	24,800	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Expansión en prueba CBR, máximo (%) (A≤0)(B≤2)(C≤2)	E - 148	0,046	0,000	0,116	0,023	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Índice de colapso, Máximo 2,0 (%)	E - 157	2,340	0,560	0,696	0,608	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Contenido de sales solubles, máximo 0,2 (%)	E - 158	0,268	0,274	0,265	0,261	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	-	-	-	-

- **Mezcla #3 (relación 30% - 70%)**

Se excluye de la selección de conformidades solicitadas por el artículo 610 debido al no cumplimiento del criterio del CBR remodelado para los tipos de suelos seleccionados y adecuados (dado a que se considera un suelo inestable y altamente colapsable). Pese a que su conformidad es aceptable para suelos tolerables este trabajo investigativo busca que todos los parámetros den una conformidad aceptable en suelos seleccionados. Por esta situación y los parámetros de repetibilidad y reproducibilidad de los ensayos se sigue

determinando el incumplimiento de la mezcla. Por los resultados anteriores se excluyen los ensayos de expansión, índice de colapso y contenido de sales solubles Tabla 7.

Tabla 7. Proporción 30% Material de cantera - 70% Material RCD



Tabla 610 1. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras																	
PROPORCION 30% CANTERA - 70% RCD																	
CARACTERISTICA	NORMA INV	RESULTADOS				A				B				C			
		MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4
Porcentaje que pasa el tamiz de 2mm (N10) en masa. Máximo ≤ 80	E - 123	75,52	75,02	75,37	71,65	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Porcentaje que pasa el tamiz de 75 μ m (N200) en masa. Máximo (A \leq 25)(B \leq 35)	E - 123	16,32	20,44	23,46	22,29	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-
Límite líquido, máximo (%) (A \leq 30)(B \leq 40)(C \leq 40)	E - 125	34	29	28	28	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Índice de plasticidad, máximo (%) (A \leq 10)(B \leq 15)	E - 126	9	5	8	5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	-	-	-	-
CBR de laboratorio, mínimo (%) (A \geq 10) (B \geq 5) (C \geq 3)	E - 148	4,85	4,35	3,28	6,8	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI
Expansión en prueba CBR, máximo (%) (A \leq 0)(B \leq 2)(C \leq 2)	E - 148	0,05	0,07	0,02	0,00	NO	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

- **Mezcla #4 (relación 20% - 80%)**

Presenta un tamaño máximo 1", un porcentaje de finos mayores al 36% descartando de esta forma el criterio de porcentaje que pasa el tamiz de 75 μ m, para el criterio de índice de plasticidad arrojó una conformidad negativa dado a que tiene un índice mayor de 10% haciendo así que para ninguno de los dos tipos de suelo establecidos (seleccionados, y adecuados) cumpla, Tabla 8. Por los resultados anteriores a estos se definió no continuar dado que los ensayos iniciales no cumplían con los valores solicitados por el artículo 610 (INVÍAS Art.610 - 2.1, 2013), por ende, los ensayos correspondientes a CBR, expansión, contenido de materia orgánica, índice de colapso y contenido de sales solubles, no tuvieron desarrollo en este trabajo investigativo para la mezcla #4 (20% - 80%).

Tabla 8. Proporción 20% Material de cantera - 80% Material RCD.



TABLA RESUMEN DE LA PROPORCION 20% CANTERA - 80% RCD					
Tabla 610 I. Requisitos de los suelos para rellenos de estructuras					
CARACTERISTICA	NORMA DE ENSAYOS	RESULTADO	A	B	C
			SUELOS SELECCIONADO	SUELOS ADECUADOS	SUELOS TOLERABLES
Porcentaje que pasa el tamiz de 2mm (N10) en masa. Máximo ≤ 80	E - 123	57,13	SI	SI	-
Porcentaje que pasa el tamiz de 75 μ m (N200) en masa. Máximo (A ≤ 25)(B ≤ 35)	E - 123	37,74	NO	NO	NO
Limite liquido, máximo (%) (A ≤ 30)(B ≤ 40)(C ≤ 40)	E - 125	44	NO	SI	SI
Índice de plasticidad, máximo (%) (A ≤ 10)(B ≤ 15)	E - 126	16	NO	NO	-

Los ensayos mecánicos son los ensayos más importantes para aceptar o negar un material para venta, aplicación o uso, dado su complejidad, variabilidad y exigencias de precisión. Nuevos análisis estadísticos avanzados y modelización matemática son necesarios para interpretar los resultados, que pueden ser complicados de reproducir. Además, deben adherirse a cumplir con estándares internacionales y requisitos de INVÍAS (INVÍAS, 2022). Esto hace que los experimentos mecánicos sean un paso necesario pero desafiante en la validación de cualquier proyecto de investigación Tabla 9-Ilustración 1. CBR de laboratorio.

Tabla 9. CBR de laboratorio, mínimo (%) (A ≥ 10) (B ≥ 5) (C ≥ 3)

CBR de laboratorio, mínimo (%) (A≥ 10) (B≥ 5) (C≥ 3)

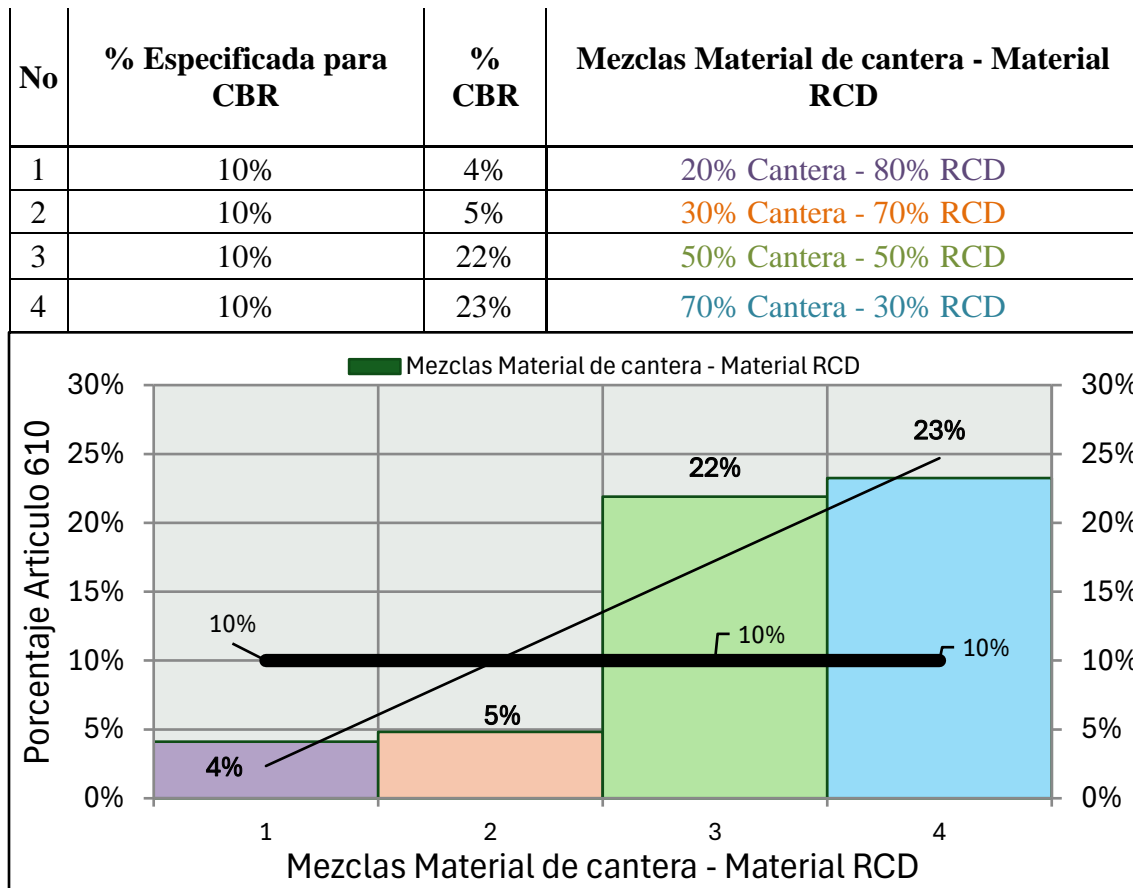


Ilustración 1. CBR de laboratorio

Sub-base granular – resultados

Para sub-base granular por medio de ensayos de laboratorio, se logró determinar que de las cuatro proporciones de mezcla de agregados grueso y fino granulares, con material de demolición de construcción fueron seleccionadas las propuestas 40% - 60%, 50% - 50%, 60% - 40% y 70% - 30% respectivamente Tabla 1.

- Mezcla #1 (relación 40% - 60%)

Se excluye de la selección de conformidades solicitadas por el artículo 320 (INVÍAS Art.320, 2013) debido al no cumplimiento del CBR remodelado para el TPDs, ver Tabla 4

- **Mezcla #2 (relación 50% - 50%)**

Se excluye de la selección de conformidades el material que no cumple con el CBR remodelado para TPDs Tabla 4 de 0 a 1000 conteos semanales de vehículos, ya que se considera un suelo inestable. También se rechaza en el ensayo de abrasión con el equipo Micro-Deval, que acepta conformidad solo para TPDs de 0 a 500 conteos semanales. Además, el ensayo de solidez en sulfatos, diseñado para evaluar la durabilidad de la roca, no es adecuado para mezclas con material de RCD Tabla 11, por lo que tampoco cumple con los requisitos (INVÍAS Art.320, 2013).

Tabla 11. Proporción 50% Material de cantera - 50% Material RCD




TABLA RESUMEN 4 REPETICIONES DE LA PROPORCION 50% CANTERA - 50% RCD																	
Tabla 320 1. Requisitos de los agregados para Sub-bases granulares.																	
CARACTERISTICA	NORMA INVE	RESULTADOS				CLASE C				CLASE B				CLASE A			
		MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4
DUREZA																	
Desgaste en la máquina de los Angeles (Gradación A), máximo (%) ≤50 - 500 revoluciones (%)	E - 118	37,40	38,30	38,10	37,80	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%) (B≤35)(A≤30)	E - 238	31,0	30,5	30,65	30,64	-	-	-	-	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
DURABILIDAD																	
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) ≤12 Sulfato de sodio	E - 220	30	28	28	31	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
LIMPIEZA (F)																	
Límite líquido, máximo (%) ≤25	E - 215	23,32	22,78	24,06	23,63	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Índice de plasticidad, máximo (%) ≤6	E - 125 Y E - 126	5,20	4,64	5,11	5,56	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Equivalente de arena, mínimo (%) ≤25	E - 133	26,10	30,90	29,05	30,80	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Contenido de terrones de arcilla y partículas delezables, máximo (%) ≤2	E - 211	1,55	1,23	0,89	0,80	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
RESISTENCIA DEL MATERIAL (F)																	
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo. (C≥30) (B≥30) (A≥40)	E-148	31,50	28,50	25,70	34,00	SI	NO	NO	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO

- **Mezcla #3 (relación 60% - 40%)**

No se incluye en la lista de conformidades según lo establecido en el artículo (INVÍAS Art.320, 2013), porque la prueba de resistencia a sulfatos no es adecuada para evaluar mezclas con material de residuos de construcción y demolición. Este método está pensado para verificar qué tan resistente es una piedra ante las condiciones del clima, así que no da una idea clara sobre mezclas que contienen residuos de este tipo. Por lo tanto, el material no puede alcanzar una conformidad positiva según los requisitos del ensayo Tabla 12.

Tabla 12. Proporción 60% Material de cantera - 40% Material RCD




TABLA RESUMEN 4 REPETICIONES DE LA PROPORCION 60% CANTERA - 40% RCD																	
Tabla 320 1. Requisitos de los agregados para Sub-bases granulares.																	
CARACTERISTICA	NORMA INV E	RESULTADOS				CLASE C				CLASE B				CLASE A			
		MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4
DUREZA																	
Desgaste en la máquina de los Angeles (Gradación A), máximo (%) ≤50 - 500 revoluciones (%)	E - 118	33.20	34.10	33.80	31.80	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%) (B≤35)(A≤30)	E - 238	19.70	16.65	16.6300	16.8200	-	-	-	-	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
DURABILIDAD																	
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) ≤12 -Sulfato de sodio	E - 220	23	21	20	19	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
LIMPIEZA (F)																	
Límite líquido, máximo (%) ≤25	E - 215	24.49	23.38	22.55	23.80	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Índice de plasticidad, máximo (%) ≤6	E - 125 Y E - 126	4.91	4.76	4.54	5.20	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Equivalente de arena, mínimo (%) ≥25	E - 133	36.11	36.54	37.43	37.68	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Contenido de terrones de arcilla y partículas delezables, máximo (%) ≤2	E - 211	1.41	1.45	1.48	1.41	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
RESISTENCIA DEL MATERIAL (F)																	
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo. (C≥30) (B≥30) (A≥40)	E-148	54.00	42.00	40.50	30.00	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO

- **Mezcla #4 (relación 70% - 30%)**

El ensayo de solidez tiene una metodología diseñada para evaluar cualitativamente la durabilidad de la roca bajo condiciones meteorológicas, no siendo adecuado para mezclas con material de RCD (INVÍAS Art.320, 2013), por esta razón el ensayo de solidez en sulfatos no cumple con los requisitos del artículo 320. Aunque el porcentaje de pérdida por

solidez en estas mezclas es significativamente menor que en otras, esto no garantiza una conformidad positiva ya que el método está orientado exclusivamente a la evaluación de la durabilidad de la roca Tabla 13.

Tabla 13. Proporción 70% Material de cantera - 30% Material RCD



TABLA RESUMEN 4 REPETICIONES DE LA PROPORCION 70% CANTERA - 30% RCD																	
Tabla 320 1. Requisitos de los agregados para Sub-bases granulares.																	
CARACTERISTICA	NORMA INV E	RESULTADOS				CLASE C				CLASE B				CLASE A			
		MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4	MEZ-1	MEZ-2	MEZ-3	MEZ-4
DUREZA																	
Desgaste en la máquina de los Angeles (Gradación A), máximo (%) ≤50	E - 118	20,70	20,60	20,20	20,40	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%) (B≤35)(A≤30)	E - 238	11,86	10,8400	10,7100	11,4300	-	-	-	-	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
DURABILIDAD																	
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) ≤12 -Sulfato de sodio	E - 220	17	17	16	15	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
LIMPIEZA (F)																	
Límite líquido, máximo (%) ≤25	E - 215	23,80	24,47	23,63	22,99	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Índice de plasticidad, máximo (%) ≤6	E - 125 Y E - 126	4,36	4,37	5,40	5,41	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Equivalente de arena, mínimo (%) ≤25	E - 133	37,97	36,44	36,71	37,77	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%) ≤2	E - 211	1,34	1,52	1,44	1,51	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
RESISTENCIA DEL MATERIAL (F)																	
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo. (C≥30) (B≥30) (A≥40)	E-148	46,00	45,50	45,00	48,00	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Las mezclas más adecuadas son realmente la mezcla 60% Cantera - 40% RCD y 70% Cantera - 30% RCD, dado a que estas cumplen con los requisitos del artículo (INVÍAS Art.320, 2013), la única diferencia es que la mezcla 60% Cantera - 40% RCD, cumple para la clase B y C siendo un porcentaje mínimo para clase a de 40% el cual no alcanza porque su capacidad portante es de 39%, mientras que la mezcla 70% Cantera - 30% RCD cumple clase A, B y C dado que la capacidad portante es mayor a 46.2%, Ilustración 2 para esta

investigación las dos son resultados aptos porque se busca conformidad para vías secundarias y terciarias.

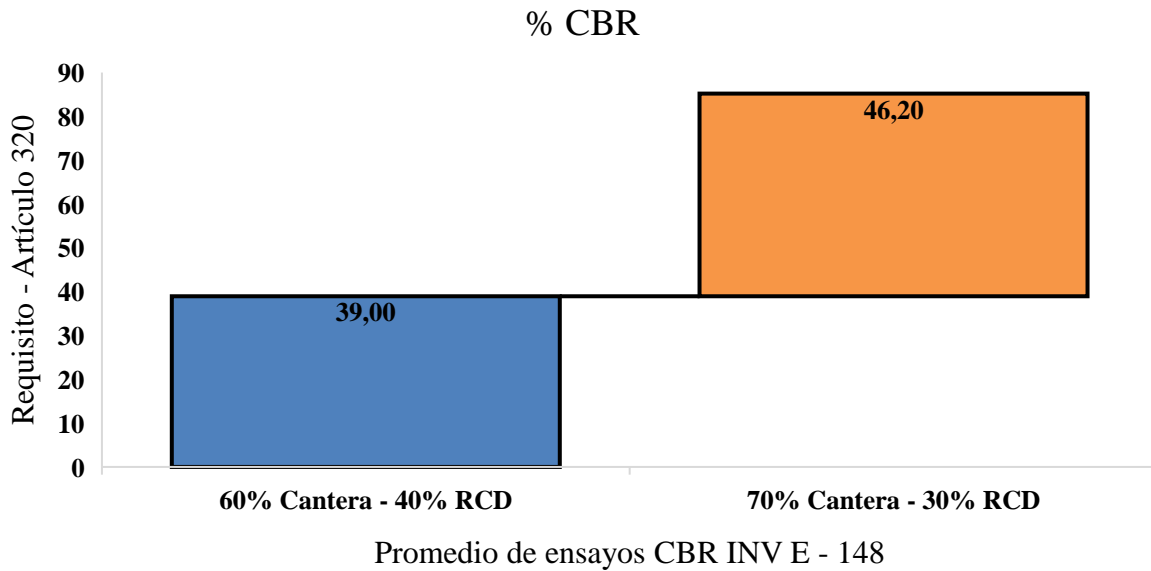


Ilustración 2. CBR (%) porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca

Así se obtuvieron resultados acordes con la investigación descrita, se observa en la Ilustración 3, el resumen de las 4 mezclas del destino relleno estructural, donde se observa el comportamiento de cada ensayo bajo la norma INV E (INVÍAS-Documentos técnicos, 2013) y donde se evidencia que el valor más importante para la aceptación o rechazo es INV E 148-13, el cual evidenció que la mezcla más acorde era 70% cantera y 30% RCD.

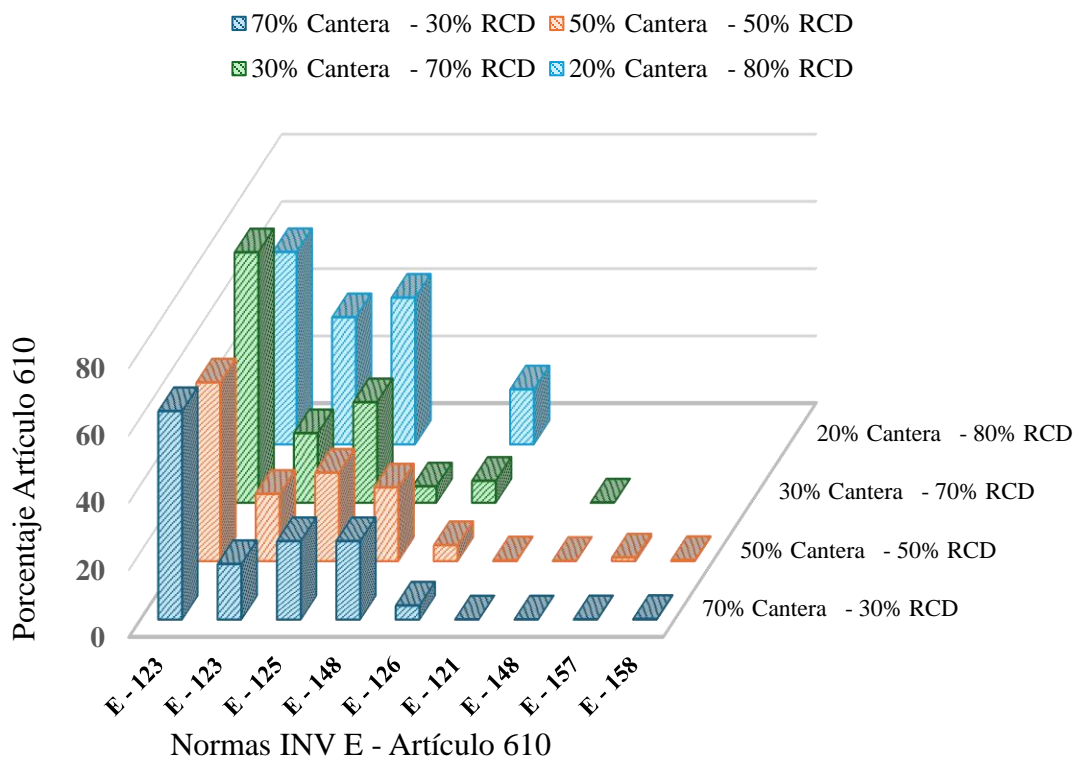


Ilustración 3. Resultados Relleno estructural, 4 Mezclas, 4 Proporciones

De esta manera, los resultados obtenidos son coherentes con la investigación descrita, y se pueden observar en la Ilustración 4. El resumen de las 4 mezclas del destino de sub-base granular, con el comportamiento de cada ensayo bajo la norma INV E (INVÍAS- Documentos técnicos, 2013), y así mismo es posible analizar la similitud de los resultados de las dos proporciones con conformidad positiva y la poca variación entre ellas.

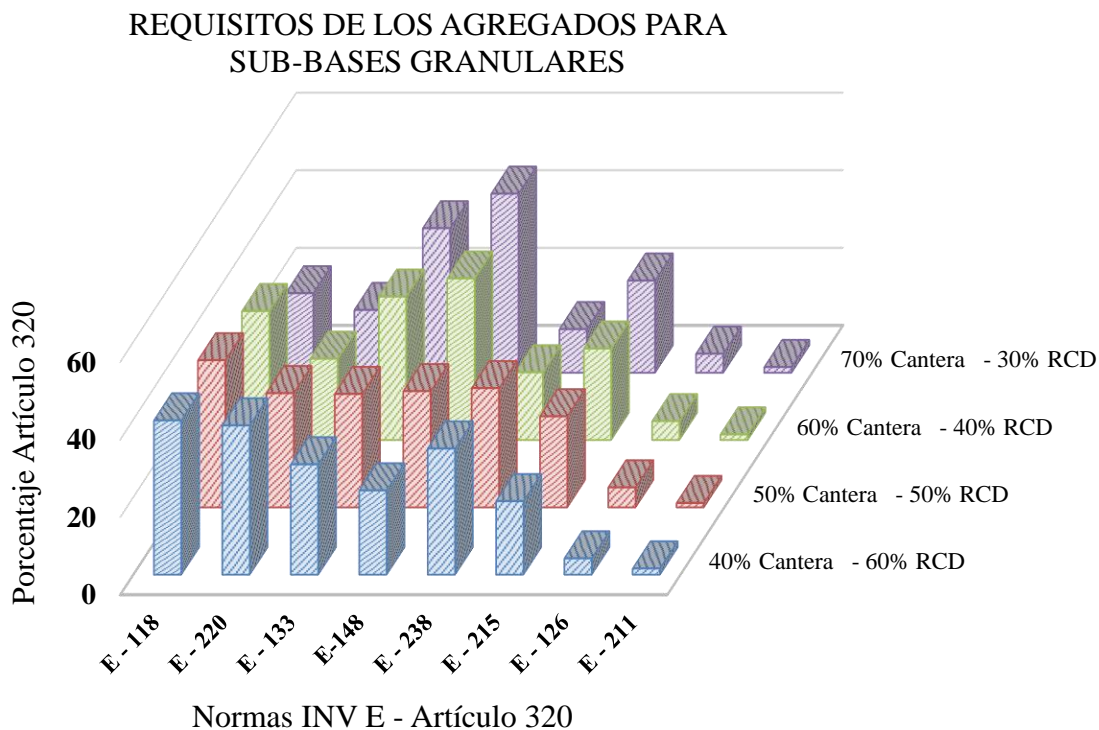
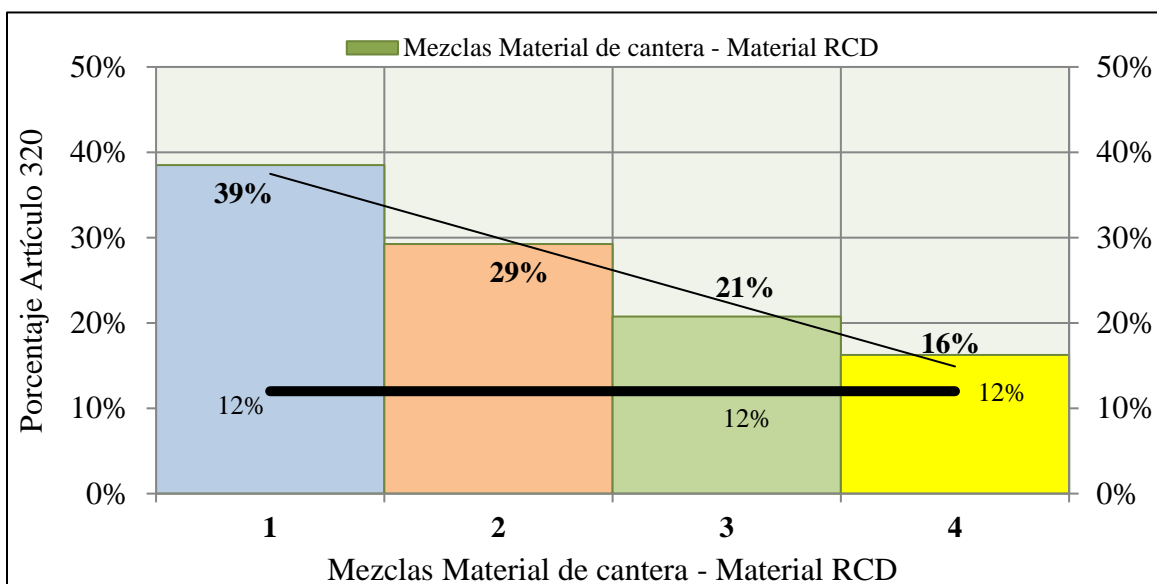


Ilustración 4. Sub-base Granular 4 Mezclas, 4 Proporciones.

El ensayo de solidez es un ensayo que no cumple para ninguna mezcla, en ninguna de sus proporciones del destino de sub-base granular, pese a que este ensayo es requerido para rocas, el ensayo se le realizó a todas las mezclas, por lo que era esperado la no aprobación a este requisito, siendo como máximo el valor de 12% todos superaron este porcentaje excluyéndolo de la aceptación del artículo de sub-base granular (INVÍAS Art.320, 2013) Tabla 14 e Ilustración 35.

Tabla 14. Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) ≤ 12 -Sulfato de sodio

Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) ≤ 12 -Sulfato de sodio			
No	% Especificada para solidez	% SOLIDEZ	Mezclas Material de cantera - Material RCD
1	12%	39%	40% Cantera - 60% RCD
2	12%	29%	50% Cantera - 50% RCD
3	12%	21%	60% Cantera - 40% RCD
4	12%	16%	70% Cantera - 30% RCD

Ilustración 5. Pérdidas en ensayo de solidez sulfato de sodio $\leq 12\%$

En la Ilustración 5, se puede observar una línea de tendencia que indica la disminución del porcentaje de solidez por cada muestra, dado a que en cada mezcla el porcentaje de roca era mayor a la anterior.

Conclusiones

- Los materiales pueden variar su porcentaje de humedad óptima a medida que se hace la repetibilidad y reproducibilidad de este a pesar de mantener un peso unitario seco máximo (g/cm^3) cercano.
- Los ensayos más determinantes para aceptar o rechazar este tipo de materiales son los ensayos mecánicos, debido a que estos son más susceptibles a errores aleatorios o sistemáticos, lo que puede reducir la precisión del método de prueba y generar resultados atípicos.
- Los ensayos demostraron que los agregados mezclados con material de demolición son adecuados para su uso como subbase granular y relleno estructural en vías secundarias y terciarias, cumpliendo con los estándares de resistencia y sostenibilidad. Esta solución aprovecha los residuos de construcción, reduce los costos y promueve la economía circular. Se recomienda optimizar las proporciones y evaluar el desempeño de estas mezclas a largo plazo.
- Los materiales pueden tener variabilidad de humedad óptima durante todas las pruebas, pese que mantienen un peso seco máximo (g/cm^3) cercano, el cual no evidencia un porcentaje alarmante de variabilidad, entre las mismas proporciones. Los ensayos más importantes para decidir si estos materiales son aptos son los mecánicos, ya que son más fáciles de sufrir errores aleatorios o sistemáticos, lo que puede afectar la precisión y causar resultados inusuales.
- La mezcla que combina 70% de material de cantera y 30% de RCD, con un tamaño máximo de $\frac{1}{2}$ pulgada, es la más adecuada para rellenar estructuras, ya que combina

- buenas propiedades mecánicas y una buena trabajabilidad. Es recomendable hacer más estudios para revisar su comportamiento a largo plazo en distintas condiciones.
- Las mezclas con 60% de cantera y 40% de RCD, así como las de 70% de cantera y 30% de RCD, son las más recomendadas porque cumplen con las normativas del artículo (INVÍAS Art.320, 2013). Sin embargo, la mezcla de 60% cantera y 40% RCD solo puede usarse en clases B y C, ya que su capacidad de carga, que es del 39%, no alcanza el mínimo del 40% para clase A. Por otro lado, la mezcla de 70% cantera y 30% RCD cumple con los requisitos para todas las clases (A, B y C), pues tiene una capacidad de carga superior al 42.6%. Esto hace que la opción de 70% cantera y 30% RCD sea más versátil y útil en diferentes aplicaciones que requieran materiales con mayor resistencia.
 - Se recomienda seguir investigando para analizar también las propiedades químicas y la microestructura de estas mezclas. Además, investigaciones orientadas a desarrollar tecnologías más eficientes y económicamente viables para el reciclaje de RCD podrían proporcionar soluciones innovadoras a largo plazo.
 - El cumplimiento de los requisitos de las mezclas que contienen material de RCD para los destinos propuestos, pueden generar un impacto positivo al medio ambiente y a la disminución de los depósitos ilegales, por medio de implementación de políticas sostenibles que impulsen la reutilización de este.

Referencias

- A Silva & Q Delgado. (2022). *Residuos de construcción y demolición como materia prima en capas de pavimentos*. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2022000100184&script=sci_arttext#aff1.
- A. López-Uceda et. (2020). *Estudio a escala real de una carretera de tráfico pesado construida con residuos de demolición reciclados in situ*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619340892>.
- Ayuso et al. (2018). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817326004>.
- C. S. Vieira & P. M. Pereira. (2015). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344915300562>.
- Circular Innovation Council. (2022). *Circular Innovation council*. Fonte: <https://circularinnovation.ca/wp-content/uploads/Maximizing-Use-Recycled-Aggregates-Presentation-Feb22.pdf>
- D. A. Rodríguez R. (2021). *Estudio Del Aprovechamiento De Los Residuos De Construcción Y Demolición “RCD” De*. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/126e06e3-b94e-4a34-8fa3-5a34880cc66a/content>.
- EPM, E. P. (2022). *Generando soluciones que aportan bienestar*,. Fonte: Generando soluciones que aportan bienestar,; <https://www.epm.com.co/content/dam/epm/institucional/documentos/documentos/informe-de-gestion-grupo-epm-2022.pdf>
- Gomez, O. (2018). *Evaluacion de las especificaciones tecnicas para el uso de asfalto*. Fonte: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/5618/digital_37583.pdf?sequence=1
- INVÍAS. (15 de Julio de 2022). *Instituto Nacional de Vias*. Fonte: Instituto Nacional de Vias: <https://www.invias.gov.co/>
- INVÍAS Art.320, A. 3. (2013). Requisitos para Sub-bases granulares. pp. <https://gerconcesion.co/invias2013/320%20SUB-BASE%20GRANULAR.pdf>.
- INVÍAS Art.610 - 2.1, A. 3. (2013). Relleno. *Instituto Nacional de Vías - INVÍAS*, pp. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/servicios-al-ciudadano/4364-cartilla-gestion-del-riesgo/file>.
- INVÍAS-Documentos técnicos, N. T. (2013). *Instituto Nacional de Vías - INVÍAS*. Fonte: Normas Tecnicas INV E-13: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-normas-de-ensayo-de-materiales-para-carreteras>
- J Crucho. L P Santos & J Neves. (2021). *Capas de pavimento tratadas con cemento que incorporan residuos de construcción y demolición y fibras de coco: una revisión*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2021.1984475>.
- J. Tavira & J. R. Jiménez. (2018). *Reciclaje de residuos de cribado y áridos mezclados reciclados de residuos de construcción y demolición en carriles bici*

- pavimentados*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618311557>.
- Ministerio de Minas y Energía, R. 1. (2005). *Ministerio de vivienda, ciudad y territorio*.
 Fuente: Ministerio de vivienda, ciudad y territorio:
https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minminas_181419_2005.htm
- Paz Morales & Quintero García. (2022). *repositorioinstitucional*. Fuente:
 repositorioinstitucional:
<https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/handle/20.500.14167/1173>
- Quintero, P. &. (2022).
<https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/handle/20.500.14167/1173>.
- Ramos B & Rosso, D. (. (2023). *repositorio*. Fuente: repositorio:
<https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/6869>
- Renovables.blog. (2023). *Residuos de construcción y demolición en vertederos a nivel mundial*. Fuente: <https://renovables.blog/reciclaje/residuos-construccion-demolicion/residuos-de-construccion-y-demolicion-en-vertederos-a-nivel-mundial/>
- Roa - C. C. & Porras. (2019). *Ciencia Unisalle*. Fuente: Ciencia Unisalle:
https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/552/?utm_source=ciencia.lasalle.edu.co%2Fing_civil%2F552&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
- Romero Y. & Pulido C. (2019). *Caracterización bajo especificaciones INVIAS 2014 de la subbase granular producida en las canteras mina Guatiquía S A S, Gravicon S A Y Otraspel LTDA en la ciudad de Villavicencio Meta*. Fuente:
<https://1library.co/article/equivalente-de-arena-caracterizaci%C3%B3n-del-material.9ynje50z>
- Sanchez, D. L. (2022). <https://circularinnovation.ca/wp-content/uploads/Maximizing-Use-Recycled-Aggregates-Presentation-Feb22.pdf> .