

**ESTABILIZACIÓN DE MATERIAL GRANULAR CON MATERIAL RECICLADO DE
CONCRETO ASFÁLTICO.**



**ANDERSSON HOYOS GUERRERO
LUIS GONZALO GARCIA MAYOR**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
2026**

**ESTABILIZACIÓN DE MATERIAL GRANULAR CON MATERIAL RECICLADO DE
CONCRETO ASFÁLTICO.**



**ANDERSSON HOYOS GUERRERO
LUIS GONZALO GARCIA MAYOR**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR:
ING. DIEGO DUQUE ARANGO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
2026**

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad del Valle por brindarnos la oportunidad de formarnos en esta carrera y por convertirse en un pilar fundamental para construir nuestras metas profesionales. A nuestros padres, por su apoyo constante, su acompañamiento y la confianza depositada en nosotros a lo largo de todo este proceso. A nuestros hermanos y a mi familia, por el ánimo y la motivación en los momentos de mayor exigencia. A nuestros compañeros de estudio, por el aprendizaje compartido, la colaboración y el respaldo durante la etapa académica. Finalmente, a nuestro director de trabajo de grado, por su orientación, sus aportes técnicos y su disposición para guiar el desarrollo de esta investigación. Cada una de estas personas ha contribuido de manera significativa a mi formación académica y personal; sin su apoyo, este camino habría sido mucho más difícil.

RESUMEN

“Estabilización de material granular con material reciclado de concreto asfáltico” es un trabajo de investigación orientado a evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en la estabilización de materiales granulares para infraestructura vial. A través de ensayos de laboratorio y análisis comparativos, se estudia el comportamiento mecánico de mezclas con diferentes porcentajes de RAP, determinando su capacidad portante, cumplimiento normativo y posibles aplicaciones en subbases, afirmados y rellenos estructurales. Los resultados evidencian que la incorporación de RAP puede representar una alternativa sostenible para reducir costos, disminuir el uso de materiales vírgenes y promover prácticas de construcción más amigables con el medio ambiente en proyectos viales.

Palabras clave: *Material granular, estabilización, concreto asfáltico reciclado, RAP.*

TABLA DE CONTENIDO.

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
2.	PROBLEMA.....	12
2.1.	Descripción del problema.....	12
2.2.	Formulación del problema.....	14
2.3.	Objetivos.....	15
2.3.1.	Objetivo general.	15
2.3.2.	Objetivos específicos.....	15
2.4.	Justificación.....	15
3.	MARCO DE REFERENCIA.....	16
3.1.	Antecedentes.....	16
3.2.	Estado del arte.	19
4.	METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	22
4.1.	Caracterización de material granular.....	22
4.1.1.	<i>Procedencia del material granular.....</i>	22
4.1.2.	<i>Granulometría.....</i>	23
4.1.3.	<i>Resistencia a los sulfatos.</i>	25
4.1.4.	<i>Equivalente de arena.....</i>	26
4.1.5.	<i>Contenido de terrones de arcillas y partículas deleznales.....</i>	27
4.1.6.	<i>Desgaste en la máquina de Los Ángeles.....</i>	27
4.1.7.	<i>Proctor modificado.....</i>	29
4.1.8.	<i>CBR.....</i>	31
4.1.9.	<i>Clasificación de material según invias.....</i>	34
4.2.	Caracterización del material RAP.....	37
4.2.1.	<i>Procedencia del RAP.....</i>	37
4.2.2.	<i>Granulometría.....</i>	37
4.3.	Diseño y caracterización del material granular + RAP.....	41
4.3.1.	<i>Granulometría.....</i>	41
4.3.2.	<i>Proctor modificado.....</i>	44
4.3.3.	<i>CBR.....</i>	50
4.3.4.	<i>Comparación de las 3 mezclas.....</i>	62
4.3.5.	<i>CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS Y POSIBLES USOS.....</i>	63
4.3.6.	<i>COMPARACIÓN ECONÓMICA DE SUS POSIBLES USOS.....</i>	70
4.3.7.	<i>Comparación del impacto ambiental.....</i>	85

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
5.1.	Conclusiones.....	87
5.2.	Recomendaciones.....	88
6.	REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	90
7.	RECURSOS.....	91
7.1.	Bibliografía.....	91

LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1. Granulometría del material granular.....	23
Tabla 2. Resistencia a los sulfatos del material granular (Fracción gruesa).....	25
Tabla 3. Resistencia a los sulfatos del material granular (Fracción fina).....	25
Tabla 4. Equivalente de arena de material granular.....	26
Tabla 5. Contenido de terrones de arcillas y partículas deleznales.	27
Tabla 6. Masa inicial y lavada.	27
Tabla 7. Granulometría de material granular para desgaste en máquina de Los Ángeles.	28
Tabla 8. Preparación de la muestra y carga abrasiva para el ensayo de desgaste Los Ángeles.....	28
Tabla 9. Cálculo del porcentaje de desgaste en la Máquina de Los Ángeles (gradación A).	29
Tabla 10. Datos de ensayo y cálculos del Proctor Modificado (humedad y densidad seca).	30
Tabla 11. Datos de compactación y humedad para el ensayo CBR.....	31
Tabla 12. Lecturas de carga y cálculo del CBR (penetración–esfuerzo).....	32
Tabla 13. Requisitos de los agregados para subbases granulares.	34
Tabla 14. Franjas granulométricas del material granular.	35
Tabla 15. Comparativa de los agregados para subbases granulares.	36
Tabla 16. Granulometría del material reciclado de pavimento asfáltico.	38
Tabla 17. Granulometría de mezcla 60% subbase y 40% RAP.	42
Tabla 18. Granulometría de mezcla 50% subbase y 50% RAP.	42
Tabla 19. Granulometría de mezcla 40% subbase y 60% RAP.	43
Tabla 20. Datos de ensayo y cálculos del Proctor Modificado (humedad y densidad seca).	45
Tabla 21. Datos de ensayo y cálculos del Proctor Modificado (humedad y densidad seca).	46
Tabla 22. Datos de ensayo y cálculos del Proctor Modificado (humedad y densidad seca).	48
Tabla 23. Datos de compactación y humedad para el ensayo CBR.	50
Tabla 24. Lecturas de carga y cálculo del CBR (penetración–esfuerzo).....	52
Tabla 25. Datos de compactación y humedad para el ensayo CBR.	55
Tabla 26. Lecturas de carga y cálculo del CBR (penetración–esfuerzo).....	56
Tabla 27. Datos de compactación y humedad para el ensayo CBR.	59
Tabla 28. Lecturas de carga y cálculo del CBR (penetración–esfuerzo).....	60
Tabla 29. Cuadro comparativo de CBR.	63
Tabla 30. Requisitos de los agregados para subbases granulares.	64
Tabla 31. Franjas granulométricas del material granular.	64
Tabla 32. Requisitos de los agregados para afirmados.....	66
Tabla 33. Franjas granulométricas del material de afirmado.	66
Tabla 34. Relaciones que debe cumplir el material de afirmado.....	67
Tabla 35. Requisitos para materiales granulares tipo SBG o BG.....	69
Tabla 36. Franjas granulométricas para materiales granulares tipo SBG o BG.	69
Tabla 37. APU de subbase granular clase C.....	71
Tabla 38. APU de 60% subbase granular clase C + 40%RAP.....	72
Tabla 39. APU de 50% subbase granular clase C + 50%RAP.....	73
Tabla 40. APU de 40% subbase granular clase C + 60%RAP.....	74
Tabla 41. Cuadro comparativo de porcentajes de ahorro de subbase.....	75
Tabla 42. APU de Afirmado.	76
Tabla 43. APU de Afirmado (60% subbase granular clase C + 40%RAP).	77
Tabla 44. APU de Afirmado (50% subbase granular clase C + 50%RAP).	78
Tabla 45. APU de Afirmado (40% subbase granular clase C + 60%RAP).	79
Tabla 46. Cuadro comparativo de porcentaje de ahorro de afirmado.....	80

Tabla 47. APU de Rellenos para estructuras.	81
Tabla 48. APU de Rellenos para estructuras (60% subbase granular clase C + 40%RAP).....	82
Tabla 49. APU de Rellenos para estructuras (50% subbase granular clase C + 50%RAP).....	83
Tabla 50. APU de Rellenos para estructuras (40% subbase granular clase C + 60%RAP).....	84
Tabla 51. Cuadro comparativo de porcentaje de ahorro de relleno estructural.	85

LISTADO DE GRÁFICAS.

Gráfica. 1. Granulometría del material granular.	24
Gráfica. 2. Curva de compactación, densidad seca vs humedad.....	30
Gráfica. 3. Curva de compactación.....	32
Gráfica. 4. Curvas esfuerzo–penetración del ensayo CBR (56, 25 y 10 golpes).	33
Gráfica. 5. Relación densidad seca–%CBR.....	33
Gráfica. 6. Granulometría de material granular + límites granulométricos de subbase granular SBG-38.....	35
Gráfica. 7. Granulometría del material reciclado de pavimento asfáltico.....	39
Gráfica. 8. Curva granulométrica de las 3 mezclas de diseño.	43
Gráfica. 9. Curva de compactación, densidad seca vs humedad.....	45
Gráfica. 10. Curva de compactación, densidad seca vs humedad.....	46
Gráfica. 11. Curva de compactación, densidad seca vs humedad.....	48
Gráfica. 12. Curva de compactación.....	51
Gráfica. 13. Curvas esfuerzo–penetración del ensayo CBR (56, 25 y 10 golpes).	53
Gráfica. 14. Relación densidad seca–%CBR.....	54
Gráfica. 15. Curva de compactación.....	55
Gráfica. 16. Curvas esfuerzo–penetración del ensayo CBR (56, 25 y 10 golpes).	57
Gráfica. 17. Relación densidad seca–%CBR.....	58
Gráfica. 18. Curva de compactación.....	59
Gráfica. 19. Curvas esfuerzo–penetración del ensayo CBR (56, 25 y 10 golpes).	61
Gráfica. 20. Relación densidad seca–%CBR.....	61
Gráfica. 21. Granulometría de las 3 mezclas y límites de material SBG-38.	65
Gráfica. 22. Granulometría de las 3 mezclas y límites de afirmado.	67
Gráfica. 23. Granulometría de las 3 mezclas y límites de material de relleno.....	69

LISTADO DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Estructura típica de carretera.	12
Ilustración 2. Fresado de Asfalto.	13
Ilustración 3. Mezcla y cuarteo para toma de muestra de material granular.	24
Ilustración 4. Zona de procedencia del RAP.	37
Ilustración 5. Mezcla, cuarteo y lavado de material RAP.....	38

1. INTRODUCCIÓN.

La estabilización de material granular con concreto asfáltico reciclado (RAP) representa una alternativa innovadora y sostenible en la ingeniería vial en Colombia. En un contexto donde la conservación ambiental y la optimización de recursos son prioritarias, esta técnica se consolida como una solución integral que promueve la economía circular. El empleo de RAP permite reincorporar material fresado a nuevas capas estructurales, disminuye la disposición de residuos y reduce la extracción de agregados vírgenes, con impactos positivos en costos y huella de carbono. Además, la presencia de ligante residual y la adecuación de la gradación pueden mejorar la cohesión y el desempeño mecánico del material compuesto, siempre que se controlen su variabilidad, humedad y compactación. Este enfoque ofrece una ruta viable para obras de construcción y mantenimiento, alineada con políticas de sostenibilidad, sin sacrificar criterios de durabilidad y servicio exigidos por la red vial colombiana.

Ante la escasez de recursos y la necesidad de reducir el impacto ambiental, este trabajo busca comprender de manera rigurosa cómo la reutilización de concreto asfáltico reciclado (RAP) puede no solo mejorar las propiedades mecánicas y estructurales del material granular, sino también disminuir los costos operativos y de ciclo de vida. Para ello se propone analizar a detalle la caracterización física y granulométrica de los insumos, diseño de mezclas con diferentes porcentajes de RAP, determinación de humedad óptima y evaluación de la respuesta mediante CBR; los resultados obtenidos para las mezclas RAP–material granular se contrastarán con la normativa aplicable para identificar su nivel de cumplimiento y, con base en ello, proponer los usos más adecuados dentro del marco técnico vigente, ya sea en capas estructurales como base o subbase, o en aplicaciones alternativas como rellenos o afirmados, según corresponda. De manera complementaria, se estimarán los costos de producción y colocación, así como los potenciales beneficios asociados a la reducción de transporte, extracción de agregados y disposición de materiales, con el fin de generar insumos sustentados en evidencia cuantitativa que orienten decisiones de diseño, elaboración de especificaciones y estrategias de conservación vial con criterios de sostenibilidad en la región.

2. PROBLEMA

2.1. Descripción del problema.

El material granular está conformado por una mezcla de partículas de origen pétreo, como grava, arena y piedra triturada, cuidadosamente seleccionadas por su resistencia mecánica y su capacidad para distribuir cargas y facilitar el drenaje. Este tipo de capa estructural se emplea en la construcción de pavimentos para proporcionar soporte a las capas superiores y garantizar la estabilidad de la vía.



Ilustración 1. Estructura típica de carretera.

Fuente: Propia.

Los materiales granulares cumplen funciones fundamentales en la estructura de las carreteras. Su principal propósito es distribuir uniformemente las cargas vehiculares hacia las capas inferiores, minimizando deformaciones y previniendo la aparición de grietas en el pavimento. Además, proporciona una plataforma firme y estable para las capas superiores, como la carpeta asfáltica o de concreto, asegurando un soporte adecuado y evitando irregularidades en la superficie de rodadura. Gracias a su permeabilidad, la subbase granular facilita el drenaje lateral del agua, lo que contribuye a mantener secas las capas inferiores y a prevenir daños estructurales por saturación. Asimismo, actúa como una capa intermedia que reduce la interacción directa entre la subrasante y la capa de rodadura, ayudando a controlar el desarrollo de fisuras.

Esta puede ser estabilizada con diversos aditivos o técnicas para mejorar su desempeño estructural y aumentar la durabilidad del pavimento. Esta estabilización permite incrementar su capacidad de carga, disminuir la deformación bajo el tránsito y reducir la infiltración de agua. Como resultado, se mejora la vida útil del pavimento, especialmente en zonas con suelos débiles o sometidas a tránsito pesado, y se reducen problemas como la formación de baches, asentamientos diferenciales y erosión.

Por otro lado, el reciclado de concreto asfáltico RAP, o "Recycled Asphalt Pavement" por sus siglas en inglés se refiere al asfalto reciclado que se utiliza en la construcción y rehabilitación de carreteras. Cuando se retira el pavimento asfáltico viejo durante el proceso de fresado o demolición de carreteras, el material resultante se puede reciclar y reutilizar como RAP. El uso de este en la construcción de carreteras no solo ayuda a reducir los costos y la demanda de materiales vírgenes, sino que también es una práctica ambientalmente sostenible al reducir la cantidad de residuos de construcción que van a parar a vertederos.



Ilustración 2. Fresado de Asfalto.

Fuente: Tomado de "What is asphalt milling?", por **All Asphalt Services** (s. f.), *All Asphalt Services*.

Según investigaciones del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) de Colombia, en el año 2011 se generaron un total de 22.270.338 toneladas de Residuos de Construcción y Demolición - RCD en varias localidades del país, incluyendo Bogotá, Medellín, Santiago de Cali, Manizales, Cartagena, Pereira, Ibagué, Pasto, Barranquilla, Neiva, Valledupar y San Andrés (MADS, 2011).

Los residuos de concreto asfáltico (como el material fresado o proveniente de demoliciones de carpeta asfáltica) impactan negativamente en el sector de la construcción de infraestructura vial y de transporte cuando no se gestionan de manera planificada y sostenible. Durante la ejecución de proyectos de construcción, rehabilitación, mantenimiento o demolición, es frecuente que se generen volúmenes importantes de estos desechos, los cuales deben ser acopiados, cargados, transportados y finalmente dispuestos en sitios autorizados. Cada una de estas etapas implica recursos: maquinaria, mano de obra, combustibles, tiempos de operación y, en muchos casos, pagos por derechos de disposición o alquiler de áreas de acopio, lo que se traduce en costos adicionales significativos.

En la práctica, el manejo de estos escombros puede representar una carga considerable dentro del presupuesto total de los proyectos viales, porque compite directamente con rubros esenciales

como el movimiento de tierras, la conformación de subrasantes o la instalación de capas granulares. Cuando los residuos deben trasladarse a distancias largas por falta de sitios cercanos de disposición o por restricciones normativas, los costos se incrementan aún más debido al número de viajes, el desgaste de equipos, el consumo de combustible y las posibles demoras logísticas. Esto puede derivar en mayores costos totales del proyecto e incluso en dificultades para cumplir cronogramas si la evacuación del material se convierte en un cuello de botella operativo.

Adicionalmente, la dependencia de materiales vírgenes para la construcción de capas granulares (base o subbase) puede aumentar todavía más la carga presupuestaria. La extracción, trituración, clasificación y transporte de agregados naturales implican costos directos y también impactos indirectos: presión sobre canteras, mayor huella de carbono por transporte y posibles afectaciones ambientales asociadas a la explotación de fuentes. Este panorama se agrava cuando el proveedor de material granular se encuentra lejos del frente de obra, situación que eleva el costo por metro cúbico colocado debido a fletes más altos, tiempos de desplazamiento y menor eficiencia de la flota de transporte. En consecuencia, los proyectos terminan asumiendo simultáneamente dos cargas económicas: pagar por retirar y disponer el material asfáltico residual, y pagar por traer agregados vírgenes desde otras fuentes para conformar las capas estructurales del pavimento.

Es importante mencionar también que la explotación de recursos vírgenes para utilizarlos como material granular de carreteras plantea problemas ambientales significativos, incluida la degradación de ecosistemas naturales, la contaminación del aire y el agua, y el agotamiento de recursos a largo plazo. La extracción intensiva de materiales como grava, arena y piedra triturada puede conducir a la deforestación, la pérdida de hábitats naturales y la contaminación del aire y el agua. Además, el uso no sostenible de estos recursos puede agotarlos y tener repercusiones negativas para las generaciones futuras.

2.2. Formulación del problema.

¿Cuál es la viabilidad técnica y económica de la estabilización de un material granular con la adición de RAP?

2.3. Objetivos.

2.3.1. Objetivo general.

- Evaluar la viabilidad técnica y económica de la estabilización de material granular con RAP en la ciudad de Cali, Valle del Cauca.

2.3.2. Objetivos específicos.

- Analizar la bibliografía sobre el uso del RAP en estabilización de material granular.
- Caracterizar las propiedades del RAP y el material granular.
- Evaluar el comportamiento del material granular con la adición de RAP en proporciones del 40%, 50% y 60%, con el fin de determinar si las mezclas resultantes cumplen los parámetros de calidad establecidos por las especificaciones tipo INVIAS.
- Definir usos alternativos para las mezclas que no cumplan los requisitos estructurales, considerando su comportamiento mecánico y su posible aplicación en soluciones funcionales dentro de la infraestructura vial y geotécnica.
- Comparar técnica y económicamente el material granular tipo INVIAS y el material granular con adición de RAP.

2.4. Justificación.

La implementación de la estabilización de material granular con RAP en el sector de la construcción vial es crucial debido a su capacidad para proporcionar una solución rentable y sostenible. Al reutilizar el RAP en la estabilización de material granular, las empresas constructoras pueden reducir costos operativos al disminuir la necesidad de adquirir materiales nuevos y minimizar los gastos asociados con la disposición de residuos. Además, esta práctica promueve la sostenibilidad ambiental al reducir la extracción de recursos naturales y la generación de residuos, alineando así las operaciones de construcción con los objetivos de conservación ambiental y eficiencia económica en el largo plazo.

Según Cueto Ramos, O.M. & Roza Álvarez, C.A. (2022) en los últimos años, ha habido un progreso significativo en el uso de pavimento asfáltico reciclado en la construcción y renovación de carreteras. Este avance se ha logrado a través de mejoras en las técnicas de reciclaje, obtención y reutilización, lo que ha generado una serie de beneficios tanto económicos como ambientales. Entre estos beneficios se incluye la reducción de la extracción de materiales

granulares, los costos de producción, así como también mejoras en la logística, entre otros aspectos.

En la dimensión de planeación y política pública, la reutilización de RAP no aparece como una práctica aislada, sino como una apuesta institucional explícita: el plan de desarrollo adoptado por el Concejo de Santiago de Cali incorpora una línea de “rehabilitación eco-sostenible” para la red vial que plantea mantener y/o rehabilitar vías mediante “pavimento reciclado”, definido como la reutilización de secciones envejecidas al final de su vida útil, “siguiendo el proceso de reciclaje RAP”. Además, el mismo instrumento justifica el enfoque por ahorro de costos y beneficios ambientales (menor extracción y transporte de agregados), e incluso delimita condiciones operativas mínimas (uso de fresadoras y acopio del material recuperado en talleres del municipio), lo cual constituye evidencia normativa-programática de que, al menos a nivel de diseño de política pública, existe una intención formal de incorporar el RAP como insumo en la conservación de la infraestructura vial y, por tanto, una necesidad de sustentar técnicamente su desempeño y criterios de aceptación.

Además, la estabilización de material granular con RAP es de suma importancia para el sector gubernamental debido a sus implicaciones directas en la consecución de objetivos de sostenibilidad y gestión de residuos. Al promover el uso de materiales reciclados en proyectos de infraestructura vial, los gobiernos pueden avanzar hacia prácticas de construcción más sostenibles, alineadas con políticas ambientales y de desarrollo sostenible. Esta medida no solo contribuye a optimizar la eficiencia de los recursos, reduciendo la extracción de nuevos materiales, sino que también ayuda a mitigar los impactos ambientales negativos asociados con la construcción y el mantenimiento de carreteras, lo que en última instancia promueve un desarrollo más equilibrado y responsable a nivel gubernamental.

3. MARCO DE REFERENCIA.

3.1. Antecedentes.

Las primeras iniciativas para evaluar los materiales procedentes de la demolición de pavimentos con la finalidad de utilizarlos como agregados en la construcción se dieron a mediados del siglo XX, concretamente en la década de los 40's. La destrucción de grandes ciudades en la época de posguerra impulsó fuertemente a que la gran cantidad de escombros y desechos se tuvieran que aprovechar en distintos campos de la construcción, con la prioridad de reducir la necesidad de

utilizar nuevos terrenos para la disposición y traslado de estos materiales y a su vez atenuar la demanda de materiales vírgenes para la reconstrucción urbana.

Estados Unidos emergió como líder en la implementación de pavimentos asfálticos reciclados, al apreciar las ventajas tanto económicas como ambientales que esta metodología ofrecía. Esta iniciativa ejemplar inspiró a otras naciones, entre ellas Canadá, Alemania, Holanda, Brasil y España, a adoptar y expandir esta práctica, desencadenando así un notable incremento en el aprovechamiento de materiales reciclados destinados a la pavimentación. En el desarrollo de técnicas de reciclaje, como el uso de emulsiones asfálticas y la recuperación de pavimentos asfálticos ineficientes mediante fresado, la crisis energética de los años 70 también desempeñó un papel crucial. Sin embargo, en las décadas siguientes, se observó una disminución significativa en el uso de ciertos compuestos asfálticos nocivos para el medio ambiente, impulsada por el crecimiento de la conciencia ambiental. (Miranda-Argüello, F., & Aguiar-Moya, J. P. (2019)).

Para los años 80 ya existía una conciencia mucho más elaborada frente a los incalculables daños que estaba causando el hombre al medio ambiente, lo que conllevó a una disminución tan drástica de los rebajados asfálticos en la construcción de carreteras, que para comienzo de los años '90 el uso de estos compuestos ya estaba casi suprimido. Hoy en día no se utilizan en ninguna obra de mantenimiento o construcción de carreteras.

Se evidenciaba un crecimiento exponencial en la generación de residuos de construcción y demolición a nivel mundial a medida que avanzaba el siglo XXI, con cifras alarmantes tanto en Estados Unidos, Japón, la Comunidad Europea, Alemania y Holanda. Esta situación impulsó aún más la necesidad de buscar alternativas sostenibles y eficientes en el manejo de estos materiales, fomentando el reciclaje y la reutilización como prácticas clave. La utilización de RAP Colombia alcanzó un 50%, mientras que en países como Estados Unidos y varios países europeos llegó hasta un 80%. Esta tendencia se alinea con un enfoque global hacia la reducción del impacto ambiental y la optimización de recursos.

En el 2002 en Omán, se realizó una investigación en la cual se utilizaron porcentajes de RAP entre el 70% hasta el 100%, de la cual se concluyó que realizar esta aplicación contribuyó a la disminución en el espesor de la capa requerida en comparación de una base granular convencional (Al-Harty, A., Al-Shamsi, K., Al-Zubeidi, M., Taha, R. (2002)).

Diferentes estudios han encontrado que la adición del RAP al material granular virgen cambia las propiedades mecánicas y, por tanto, el desempeño de la capa granular del pavimento (Arshar &

Farooq, 2017). En una comparación de propiedades mecánicas llevada a cabo por (Bennert & Maher, 2005) y (Papp & Maher, 1998) se encontró que las mezclas de agregado virgen con RAP tienen un decrecimiento en propiedades como la densidad seca, el contenido óptimo de agua, pero tienen un aumento en su módulo resiliente, a diferencia de una base compuesta 100% por agregados vírgenes.

En Colombia, el aprovechamiento del material fresado (RAP) se ha ido consolidando tanto por lineamientos institucionales como por experiencias de obra, en la medida en que el fresado se reconoce formalmente como una actividad de rehabilitación y el material recuperado puede gestionarse para su aprovechamiento o disposición controlada. Desde el marco normativo, las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras de INVÍAS incluyen el ítem de fresado de pavimento asfáltico, y allí se establece el manejo del material resultante, haciendo énfasis en su acopio y control para evitar contaminación y permitir su uso posterior cuando aplique (Instituto Nacional de Vías [INVÍAS], 2012).

En los últimos años, el tema también ha sido reforzado mediante documentos técnicos orientados a estandarizar prácticas de manejo del RAP en el país. En ese sentido, INVÍAS ha divulgado una cartilla de buenas prácticas para el manejo y uso del material recuperado de pavimentos asfálticos (RAP), elaborada con apoyo académico (Universidad Militar Nueva Granada), lo cual refleja un interés institucional en orientar la reutilización del material fresado bajo criterios técnicos, ambientales y de trazabilidad (INVÍAS, 2024).

A nivel de aplicación práctica en entidades públicas, un antecedente claro se observa en Bogotá, donde la Unidad de Mantenimiento Vial (UMV) reporta el uso del RAP como materia prima para producir “fresado estabilizado”, mezclándolo en planta con emulsión asfáltica y cemento hidráulico, y destinándolo al mantenimiento de vías terciarias y sectores rurales, complementado con control de calidad desde laboratorio de suelos y pavimentos (Unidad de Mantenimiento Vial [UMV], 2024).

Desde el ámbito académico colombiano, se encuentran estudios que analizan el desempeño del RAP y sus combinaciones con agregados naturales, tanto en capas granulares como en materiales reciclados para estructuras viales. Por ejemplo, se ha documentado el análisis de mezclas recicladas y su potencial uso en capas granulares, discutiendo la influencia del contenido de RAP en propiedades de soporte y comportamiento mecánico (Guio Vargas & Sánchez Abril, 2013). De forma complementaria, existen trabajos de grado en el país que evalúan la factibilidad técnica y económica del uso de RAP en bases granulares, incorporando

metodologías experimentales y criterios de comparación con materiales convencionales (Chaparro Quevedo & Hernández Rubio, 2018).

Finalmente, también se identifican antecedentes en repositorios universitarios donde se aborda la caracterización del RAP (origen, variabilidad y propiedades físicas) como etapa previa para definir su procesamiento (cribado/trituración), su compatibilidad con agregados y su desempeño esperado cuando se reutiliza en soluciones viales. Este tipo de trabajos enfatiza que la variabilidad del material fresado exige control de calidad y criterios de selección para reducir incertidumbre al momento de incorporarlo en mezclas o capas de la estructura del pavimento (p. ej., caracterizaciones académicas en universidades distritales) (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021).

3.2. Estado del arte.

El RAP es un material compuesto por agregado grueso, fino y asfalto residual, que actúa como aglutinante para mejorar la cohesión de los materiales granulares. El contenido de asfalto puede variar, y también puede contener contaminantes como caucho o material orgánico, que deben ser evaluados para garantizar su calidad. Dependiendo del proceso de reciclaje, el RAP puede clasificarse en reciclado en caliente o en frío, y su calidad puede variar según su antigüedad y la homogeneidad de sus componentes.

Este material ofrece propiedades físicas y mecánicas beneficiosas para la estabilización de suelos, como una mayor densidad y resistencia a la compresión y al desgaste en comparación con suelos no tratados. Su granulometría varía según la fuente, lo que afecta la capacidad de compactación del material. Además, tiene una buena capacidad de retención de humedad, lo que puede influir en su comportamiento durante la compactación. El asfalto residual también mejora la resistencia a la humedad y las heladas, lo que lo convierte en una opción adecuada para suelos en regiones frías o con alta humedad.

El uso de RAP en la estabilización de materiales granulares mejora la adherencia y cohesión entre las partículas, lo que aumenta la estabilidad general del material. Asimismo, tiene un efecto positivo en la reducción de la plasticidad de suelos arcillosos, favoreciendo la compactación. Para garantizar su efectividad, es esencial realizar un control de calidad riguroso, evaluando parámetros como el contenido de asfalto, la granulometría y la presencia de contaminantes, para asegurar que el RAP cumpla con los requisitos técnicos del proyecto.

Estudios previos han demostrado que fresar el pavimento asfáltico existente, en lugar de simplemente cubrirlo con una nueva capa, es un método más efectivo para asegurar un

rendimiento duradero. Dado que la mayoría del material fresado (RAP) se reutiliza en mezclas asfálticas calientes, existe una escasez de información sobre la capacidad de carga y la permeabilidad del RAP en otras aplicaciones, especialmente en capas base de pavimentos. Como se va a evaluar la viabilidad de una capa de pavimento dos de las características principales que debemos analizar son la capacidad de drenaje y la resistencia de los agregados. Estos parámetros se miden a través de las pruebas de permeabilidad y el CBR.

El material granular juega un papel crucial en la estructura de un pavimento, ya que minimiza las tensiones provocadas por la carga del tráfico en las capas inferiores. Por ello, es fundamental comprender las propiedades de drenaje y resistencia del agregado empleado en la capa base. Para evaluar estas características, se suelen realizar pruebas de permeabilidad y CBR. Diversos estudios de laboratorio han analizado el material RAP, centrándose en ensayos relevantes para la construcción de capas granulares, como la compactación Proctor, CBR y el módulo resiliente, con el objetivo de determinar su idoneidad para este uso.

La capacidad de carga de las capas subbase depende en gran medida del contenido de RAP mezclado con el agregado virgen convencional (VA). El porcentaje de material RAP en las mezclas supera el 20–25%, y el valor esperado de CBR para la capa subbase disminuye según lo discutido por varios autores. Algunos investigadores han informado que el contenido de RAP en las mezclas de subbase debe limitarse a un máximo del 50% en peso.

La prueba de permeabilidad evalúa directamente la susceptibilidad a la humedad de un material compactado (saturado o no) midiendo la rapidez con la que el agua fluye a través de sus poros. La presencia de humedad atrapada entre las partículas de la capa subbase puede ocasionar su destrucción por pérdida de soporte. En las capas de rodadura asfálticas, el contenido de agua puede infiltrarse en las capas a través de grietas superficiales con el paso del tiempo.

Algunos autores han llegado a la conclusión de que la permeabilidad disminuye con el aumento del contenido de RAP, mientras que otros investigadores ofrecen opiniones y resultados opuestos. Esto se debe a los diferentes contenidos de betún, graduaciones y cantidades de contenido fino de los materiales RAP utilizados.

Finalmente, Seferoğlu, A.G en 2018 dice que el RAP es un material deficiente en términos de capacidad de carga cuando se utiliza solo. Por esta razón, debería mezclarse con material virgen de cantera o cemento. El cemento puzolánico puede ser una solución eficaz para mejorar el rendimiento de la capa subbase en cuanto a capacidad de carga y permeabilidad. El cemento

utilizado en la mezcla puede estar limitado al 3%. La adición de más del 3% de cemento al material RAP aumenta la cantidad de contenido fino (por debajo del tamiz #200).

El RAP presenta una alta variabilidad en su composición debido a la presencia de materiales del pavimento original (agregados, tratamientos superficiales, etc.) y al grado de daño sufrido durante su vida útil (McDaniel & Anderson, 2001; Smiljanic et al., 1993). Esta variabilidad se ve incrementada por el manejo inadecuado de los acopios. Para un uso efectivo del RAP en mezclas asfálticas, es necesario desarrollar técnicas apropiadas de almacenamiento y procesamiento que aseguren la mayor homogeneidad posible del material. Además, se debe tener en cuenta que el almacenamiento prolongado del RAP acelera su oxidación debido a la exposición al aire (McMillan & Palsat, 1985), lo que resalta la importancia de un control adecuado del almacenamiento para maximizar su aprovechamiento.

En 2007, el INVIAS reglamentó el uso de asfalto reciclado en frío y en caliente a través de los Artículos 461 y 462 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (INVIAS, 2007). Actualmente, estas normas se encuentran actualizadas y la reglamentación para pavimentos asfálticos reciclados se encuentra en el Capítulo 4 y en los Artículos 461-13 y 462-13.

4. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1. Caracterización de material granular.

4.1.1. Procedencia del material granular.

El material granular empleado en el desarrollo del proyecto fue suministrado por la cantera Agregados La Roca S.A.S., ubicada en el municipio de Yumbo, en el Valle del Cauca, zona reconocida por su actividad industrial y por la presencia de explotaciones de materiales pétreos que abastecen obras de infraestructura en el suroccidente del país. La localización estratégica de Yumbo, contigua al área metropolitana de Cali y con conexión a corredores viales principales, facilita la distribución de agregados hacia proyectos viales y de construcción, aspecto que favorece la logística de suministro y la disponibilidad continua del material.

Agregados La Roca S.A.S. se dedica a la explotación, procesamiento y comercialización de agregados pétreos, obtenidos a partir de operaciones de cantera y plantas de trituración y clasificación. En este tipo de instalaciones se realizan procesos como trituración primaria y secundaria, zarandeo, lavado (cuando aplica) y acopio, con el fin de producir materiales con granulometrías controladas, tales como arenas, gravas y triturados, además de mezclas granulares utilizadas comúnmente en capas de afirmado, base y subbase. La operación de producción se orienta a suministrar agregados para obras viales, concretos, morteros, rellenos y conformación de capas granulares, manteniendo trazabilidad del origen del material y control de calidad conforme a requerimientos del sector constructor.

Para esta investigación, el material proveniente de Agregados La Roca S.A.S. se utilizó como material de referencia (sin adición de RAP), con el propósito de caracterizar su comportamiento geotécnico y mecánico y establecer una línea base frente a la estabilización con concreto asfáltico reciclado (RAP). El material se seleccionó por su disponibilidad comercial y por representar un insumo típico empleado en proyectos de infraestructura vial de la región, permitiendo que los resultados obtenidos sean comparables y transferibles a condiciones reales de obra. A partir de este material se ejecutaron los ensayos de laboratorio previstos (granulometría, compactación y CBR, entre otros), con el fin de evaluar su capacidad portante y su respuesta ante variaciones de compactación, como fundamento para el análisis posterior de las mezclas estabilizadas.

4.1.2. Granulometría.

Para iniciar la caracterización de un material granular, se realiza el análisis granulométrico, el cual permite determinar la distribución del tamaño de las partículas que lo componen. En este caso, dicho análisis se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos por la norma del Instituto Nacional de Vías (INV E-123), asegurando así la confiabilidad y estandarización de los resultados obtenidos.

Peso material granular + recipiente, sin lavar y seco (g)	17205,0
Peso de recipiente (g)	1213,5
Peso material granular + recipiente, luego de ser lavado y secado (g)	17368,5
Peso de material granular lavado y secado (g)	15347

GRANULOMETRÍA					
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	%Pasa
1 1/2"	37,5	0,0	0,00%	0,00%	100,00%
1"	25	960,0	5,98%	5,98%	94,02%
3/4"	19	1569,9	9,41%	15,39%	84,61%
1/2"	12,5	4024,5	24,12%	39,51%	60,49%
3/8"	9,5	1462,5	8,76%	48,27%	51,73%
Nº4	4,75	3508,5	21,02%	69,30%	30,70%
Nº 8	2,36	1371,0	8,22%	77,51%	22,49%
Nº 16	1,18	960,0	5,75%	83,27%	16,73%
Nº 30	0,6	620,5	3,72%	86,98%	13,02%
Nº 50	0,3	312,6	1,87%	88,86%	11,14%
Nº 100	0,15	275,6	1,65%	90,51%	9,49%
Nº 200	0,075	228,0	1,37%	91,88%	8,12%
Fondo		48,4			
Total		15342			

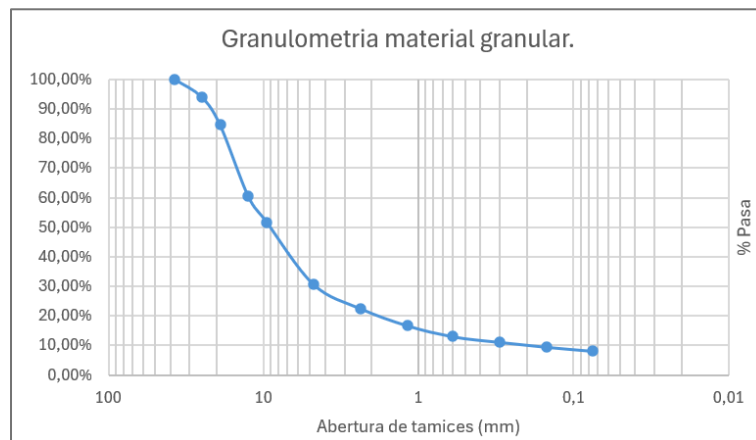
Tabla 1. Granulometría del material granular.

Fuente: Propia.

Con base en la granulometría obtenida, el material proveniente de la cantera La Roca en Yumbo, Valle del Cauca cumple con los requisitos generales establecidos por la norma INVIAS para subbases granulares, en cuanto a la distribución de tamaños de partículas. La muestra presenta una adecuada gradación, con una distribución equilibrada de partículas gruesas y finas.

El porcentaje de material retenido en los tamices más gruesos (hasta 37,5 mm) indica una buena presencia de agregados gruesos, lo que favorece la estabilidad y capacidad de carga

del material. El 8,12% de material fino (menos de 0,075 mm) es bajo, lo que garantiza una buena capacidad de compactación y reduce el riesgo de deformaciones plásticas o inestabilidad bajo carga. La granulometría muestra que el material se encuentra dentro de los rangos aceptables para su uso en la construcción de bases y subbases de pavimentos, y no presenta exceso de finos que podría comprometer la calidad del material. De acuerdo con la norma INVIAS, que especifica los límites de distribución de tamaños para subbases granulares, este material cumple con las características necesarias para ser utilizado en obras viales, garantizando una buena compactación y resistencia estructural. Este material es adecuado para la estabilización de suelos y la construcción de subbases de pavimento en condiciones de tráfico medio a alto.



Gráfica. 1. Granulometría del material granular.

Fuente: Propia.



Ilustración 3. Mezcla y cuarteo para toma de muestra de material granular.

4.1.3. Resistencia a los sulfatos.

Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a los sulfatos aplicado al material granular evidencian un buen comportamiento frente a este tipo de ataque químico. Para la fracción gruesa, la pérdida total corregida fue del 6,0 %, valor que se encuentra por debajo de los límites establecidos en normas internacionales y nacionales (ASTM C88 e INV E 220), que permiten pérdidas máximas entre el 12 % y el 18 %. Esto permite afirmar que los agregados gruesos presentan alta resistencia al deterioro por sulfatos.

FRACCIÓN GRUESA		RETENIDO		PESO (g)		% PERDIDA	
Pasa	Retenido	%	%	Inicial	Final	Inicial	Corregida
2.5"	2"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2"	1 1/2"	0,0					
1 1/2"	1"	1,2	15,9	1502,0	1407,0	6,3	1,0
1"	3/4"	9,4					
3/4"	1/2"	24,1	48,5	1001,0	933,5	6,7	3,3
1/2"	3/8"	8,3					
3/8"	# 4	23,7	35,5	300,0	285,5	4,8	1,7
PORCENTAJE TOTAL		66,8	100,0	% Total de pérdida fracción gruesa		6,0	

Tabla 2. Resistencia a los sulfatos del material granular (Fracción gruesa).

Fuente: Propia.

En cuanto a la fracción fina, la pérdida total corregida alcanzó un valor del 8,4 %, el cual también se encuentra dentro de los rangos aceptables (inferiores al 10–15 % según especificaciones). Este comportamiento confirma que el material fino mantiene una buena estabilidad química, sin evidenciar disgregaciones severas que comprometan su durabilidad.

FRACCIÓN FINA		RETENIDO		PESO (g)		% PERDIDA	
Pasa	Retenido	%	%	Inicial	Final	Inicial	Corregida
3/8"	# 4	23,7	41,7	100,5	95,3	5,2	2,2
# 4	# 8	12,9	22,6	100,0	88,0	12,0	2,7
# 8	# 16	7,6	13,3	100,0	86,0	14,0	1,9
# 16	# 30	3,7	6,5	100,0	82,6	17,4	1,1
# 30	# 50	1,9	3,3	100,2	85,7	14,5	0,5
Pasa # 50		7,1					
PORCENTAJE TOTAL		56,9	100,0	% Total de pérdida fracción fina		8,4	

Tabla 3. Resistencia a los sulfatos del material granular (Fracción fina).

Fuente: Propia.

Al analizar el comportamiento por tamices, se observa que las mayores pérdidas de masa se concentran en fracciones intermedias (#8, #16 y #30); sin embargo, dichas pérdidas no

alcanzan niveles críticos y muestran una distribución homogénea, lo cual indica que el material no presenta puntos débiles específicos.

En síntesis, el material evaluado cumple con los requisitos de resistencia a los sulfatos tanto en fracción gruesa como fina, lo que permite concluir que posee una adecuada durabilidad y resistencia al deterioro químico, siendo apto para su utilización en capas de subbase granular para pavimentos en condiciones de exposición a sulfatos.

4.1.4. Equivalente de arena.

En el ensayo de equivalente de arena se obtuvieron valores de 80 % y 75 % en los dos intentos realizados, alcanzando un promedio de 78 %. Estos resultados indican que la fracción fina del material presenta un contenido bajo de partículas plásticas o de arcilla, lo cual es favorable para su comportamiento en capas granulares de pavimento.

De acuerdo con las especificaciones técnicas (INV E 133 – INVIAS), los materiales destinados a bases y subbases granulares deben presentar un equivalente de arena superior al 30 % o 35 % dependiendo del nivel de exigencia del proyecto. Dado que el material evaluado supera ampliamente este valor (78 %), se puede concluir que posee una adecuada limpieza y calidad granulométrica, con predominio de partículas de arena sobre finos plásticos. En términos de desempeño, un alto equivalente de arena se traduce en mejor estabilidad mecánica y resistencia al deterioro por humedad, reduciendo la susceptibilidad a deformaciones permanentes y pérdida de soporte en condiciones de servicio.

Por lo tanto, se concluye que el material ensayado cumple satisfactoriamente con los criterios normativos y es apto para su utilización en capas de base o subbase granular, garantizando un buen comportamiento estructural dentro del paquete de pavimento.

# De ensayo	Ensayo 1	Ensayo 2
Lectura de arena	3,6	3,6
Lectura de arcilla	4,5	4,8
Equivalente de arena (%)	80	75
Promedio (%)	78	

Tabla 4. *Equivalente de arena de material granular.*

Fuente: *Propia.*

4.1.5. Contenido de terrones de arcillas y partículas deleznales.

De la **Tabla 5** se observa que, para cada fracción granulométrica ensayada, la pérdida inicial (material que se desintegró o se identificó como terrón/partícula deleznable) es muy baja: 0,08%, 0,18% y 0,15%. Luego, esas pérdidas se ponderan por el porcentaje que representa cada fracción dentro de la granulometría del material (9,41%, 32,43%, 23,72%), dando pérdidas ponderadas de 0,01%, 0,06% y 0,04%, respectivamente, para un total = 0,10%.

El resultado final (0,10% de terrones de arcilla y partículas deleznales) indica que el material es muy limpio y estable, con presencia prácticamente despreciable de partículas débiles o terrones que podrían desintegrarse con la compactación, el tránsito o la humedad. En una subbase granular, un contenido alto de terrones/deleznales es indeseable porque tiende a generar finos, “ensuciar” la estructura granular, afectar el drenaje y disminuir el desempeño mecánico con el tiempo especialmente en presencia de agua.

La fracción 3/4"–3/8" es la que más aporta al valor final por ser la más representativa en la granulometría y tener la mayor pérdida inicial, pero aun así se mantiene muy por debajo de cualquier nivel preocupante. Este ensayo confirma que, por este criterio, el material es apto para uso como subbase, siempre que también cumpla los demás requisitos de calidad exigidos para la clase de subbase del proyecto.

Tamaño de las partículas entre los tamices:	Masa total (g)	Masa retenida (g)	Pérdida inicial (%)	Retenido granulometría (%)	Pérdida ponderada (%)
1" - 3/4"	3019,9	3017,5	0,08	9,41	0,01
3/4" - 3/8"	1983,6	1980,0	0,18	32,43	0,06
3/8" - No 4	999,0	997,5	0,15	23,72	0,04
Porcentaje de terrones y partículas deleznales (%)					0,10

Tabla 5. Contenido de terrones de arcillas y partículas deleznales.

Fuente: Propia.

4.1.6. Desgaste en la máquina de Los Ángeles.

Con el fin de caracterizar la durabilidad mecánica del material granular (proveniente de cantera), se interpretan los resultados del ensayo de resistencia a la degradación por abrasión, impacto y molienda en la Máquina de Los Ángeles, conforme a la norma INV E–218–13.

Peso inicial (g)	16688
Peso lavado (g)	16037,5

Tabla 6. Masa inicial y lavada.

Fuente: Propia.

TAMIZ	Diametro (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje pasa(%)
1 1/2"	38,1	0	0	0	100,0
1"	25,4	201	1,2	1,2	98,8
3/4"	19,05	1569,93	9,4	10,6	89,4
1/2"	12,7	4024,5	24,1	34,7	65,3
3/8"	9,525	1387,5	8,3	43,0	57,0
# 4	4,75	3958,5	23,7	66,8	33,2
# 8	2,36	2151	12,9	79,7	20,3
# 16	1,18	1260	7,6	87,2	12,8
# 30	0,6	620,52	3,7	90,9	9,1
# 50	0,3	312,6	1,9	92,8	7,2
# 100	0,15	275,58	1,7	94,4	5,6
# 200	0,074	228	1,4	95,8	4,2
Pasa 200 por tamizado		48,39			
Total		16037,52			

Tabla 7. Granulometría de material granular para desgaste en máquina de Los Ángeles.

Fuente: Propia.

El ensayo de desgaste en Máquina de Los Ángeles se ejecutó bajo una condición estandarizada de 500 revoluciones en seco, empleando la gradación tipo A. Esta gradación define cómo se compone la muestra por intervalos de tamaño (fracciones entre tamices) y, junto con el número y la masa de las esferas, busca reproducir de manera controlada los efectos combinados de abrasión e impacto sobre el agregado. Se utilizó 12 esferas con una carga abrasiva cercana a 5000 g, y se conformó una muestra de ensayo de aproximadamente 5 kg, coherente con la metodología del ensayo.

Tamiz		A		B		C		D	
Pasa	Retenido	%	Peso tomar (g)	%	Peso tomar (g)	%	Peso tomar (g)	%	Peso tomar (g)
1 1/2	1	1,2	1250 (25)						
1	3/4	9,4	1250 (25)						
3/4	1/2	24,1	1250 (10)	24,1	2500 (10)				
1/2	3/8	8,3	1250 (10)	8,3	2500 (10)				
3/8	1/4					23,7	2500 (10)		
1/4	# 4						2500 (10)		
#4	# 8							12,9	5000 (10)
Total		43,0	5000 (10)	32,4	5000 (10)	23,7	5000 (10)	12,9	5000 (10)
# Esferas		12		11		8		6	
Peso esferas (g)		5000 (25)		4584 (25)		3330 (20)		2500 (15)	

Tabla 8. Preparación de la muestra y carga abrasiva para el ensayo de desgaste Los Ángeles.

Fuente: Propia.

A partir de los pesos consignados, la interpretación cuantitativa es directa: la masa inicial (P1) fue 5006 g y la masa final (P2) fue 4125 g, entendida operativamente como la masa que permanece luego del ensayo al evaluarse con el tamiz de control (No. 12). La pérdida de masa asociada a degradación es 881 g (5006 – 4125), y por tanto el porcentaje de desgaste es $(881/5006) \times 100 = 17,6\%$, que se reporta como 18%. Este valor representa la proporción de material que se desintegró hasta tamaños finos durante el proceso (material que pasa el tamiz de control), indicador clave de la resistencia del agregado a la fragmentación.

TIPO DE GRADACION	A
PESO DE LA MUESTRA INICIAL	5006
PESO DE LA MUESTRA FINAL (PASA TZ # 12)	4125
PORCENTAJE DE DESGASTE MAQUINA DE LOS ANGELES	18

Tabla 9. Cálculo del porcentaje de desgaste en la Máquina de Los Ángeles (gradación A).

Fuente: Propia.

Desde el punto de vista de desempeño, un 18% se considera un resultado favorable para un material destinado a subbase granular, porque sugiere alta resistencia a la degradación: el agregado conserva su integridad, genera una cantidad limitada de finos y mantiene mejor su estructura granular bajo acciones mecánicas. En términos prácticos, esto se asocia con menor riesgo de pérdida de drenaje interno y menor tendencia a variaciones no deseadas en la compactación y el soporte, especialmente durante construcción y servicio. En contraste, valores elevados de desgaste suelen relacionarse con agregados más frágiles, mayor producción de finos y potencial deterioro del comportamiento mecánico de la capa.

4.1.7. Proctor modificado.

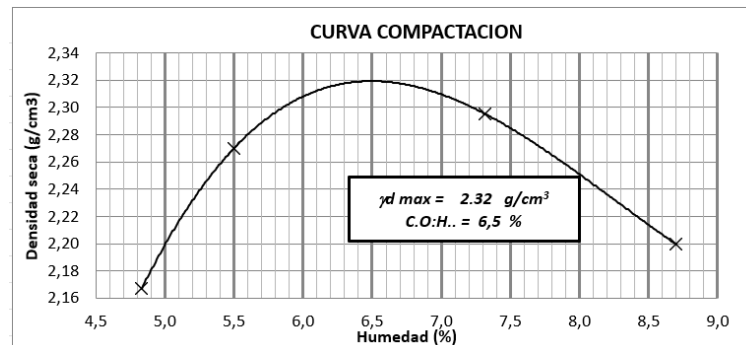
El ensayo Proctor Modificado realizado a la subbase granular (sin incorporación de RAP) evidencia el comportamiento típico de compactación de un material predominantemente granular: la densidad seca aumenta con la humedad hasta alcanzar un máximo y posteriormente disminuye cuando el contenido de agua supera el óptimo. A partir de los cuatro puntos ensayados ($w = 4,8\%$; $5,5\%$; $7,3\%$; $8,7\%$), la curva de compactación presenta una tendencia ascendente marcada entre $4,8\%$ y $5,5\%$, alcanza su zona de máximo alrededor del rango intermedio y desciende hacia $8,7\%$, lo cual confirma una selección adecuada del intervalo de humedades para capturar el pico de compactación. La ejecución del ensayo con 56 golpes por capa y 5 capas es consistente con la energía correspondiente al Proctor Modificado, garantizando que la densidad seca máxima obtenida sea representativa para control de compactación en campo.

DATOS DE ENSAYO				
Punto No.	1	2	3	4
No. de golpes	56	56	56	56
No. de Capas	5	5	5	5
Peso molde + muestra húmeda	10329	10592	10739	10584
Peso Molde	5468	5468	5468	5468
Peso de la muestra húmeda	4862	5125	5272	5117
Humedad (Horno)	4,8	5,5	7,3	8,7
Peso de la muestra seca	4637	4858	4912	4707
Volumen de la muestra	2140	2140	2140	2140
Densidad de la muestra Seca	2,17	2,27	2,30	2,20
HUMEDAD				
Peso recipiente + suelo húmedo	384,8	391,2	443,7	578,5
Peso recipiente + suelo seco	369,9	373,9	416,0	535,3
Peso recipiente	61,3	59,0	36,5	38,0
Humedad (Horno)	4,8	5,5	7,3	8,7

Tabla 10. Datos de ensayo y cálculos del Proctor Modificado (humedad y densidad seca).

Fuente: Propia.

De la curva densidad seca–humedad se determinó una densidad seca máxima de $\gamma_d, \text{máx} = 2,32 \text{ g/cm}^3$ (equivalente aproximadamente a $22,8 \text{ kN/m}^3$) y una humedad óptima de compactación de $w_{opt} = 6,5\%$. La humedad óptima relativamente baja es indicativa de un material con fracción fina limitada y baja demanda de agua para lubricación y reacomodo de partículas, característica esperable en subbases granulares. Asimismo, la caída de densidad seca para humedades superiores al óptimo sugiere sensibilidad al exceso de agua, debido a la ocupación de vacíos por agua y a la reducción de la eficiencia de compactación; por tanto, el control de humedad alrededor de w_{opt} se constituye en un factor determinante para lograr densidades secas elevadas durante la construcción.



Gráfica. 2. Curva de compactación, densidad seca vs humedad.

Fuente: Propia.

Estos resultados constituyen la línea base del material natural para comparar el efecto de la adición de RAP en etapas posteriores del estudio. En términos experimentales, el par (γ_d , w_{opt}) permite evaluar si la incorporación de RAP modifica la compactabilidad del sistema, ya sea por cambios en la estructura granular, en la fricción interna y/o por la presencia de partículas recubiertas con ligante asfáltico, aspectos que pueden reflejarse en desplazamientos del óptimo de humedad y variaciones de la densidad seca máxima.

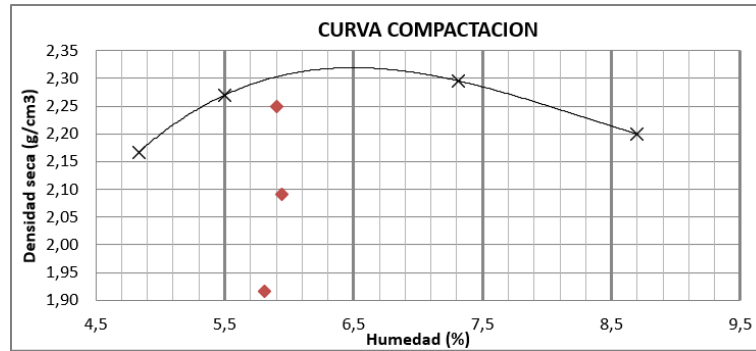
4.1.8. CBR.

El ensayo CBR se ejecutó sobre una subbase granular mediante tres niveles de energía de compactación (56, 25 y 10 golpes por capa, en 5 capas), con una humedad prácticamente constante ($w \approx 5,8-5,9\%$). En estas condiciones, las variaciones de desempeño se atribuyen principalmente al estado de compactación, reflejado en las densidades secas obtenidas: 2,25; 2,09 y 1,92 g/cm³, respectivamente, lo cual evidencia que el material responde de manera directa al incremento de energía, aumentando su densificación y capacidad portante.

DATOS DE ENSAYO			
Punto No.	1	2	3
No. de golpes	56	25	10
No. de Capas	5	5	5
Molde No.	87	52	5
Peso molde + muestra húmeda	9936	13600	11868
Peso Molde	4262	8396	7106
Peso de la muestra húmeda	5674	5204	4762
Humedad (Horno)	5,9	5,9	5,8
Peso de la muestra seca	5358	4912	4501
Volumen de la muestra	2350	2350	2350
Densidad de la muestra Seca	2,25	2,09	1,92
HUMEDAD			
Peso recipiente + suelo húmedo	408,2	352,3	409,1
Peso recipiente + suelo seco	387,6	334,6	390,0
Peso recipiente	38,0	36,5	61,3
Humedad (Horno)	5,9	5,9	5,8

Tabla 11. Datos de compactación y humedad para el ensayo CBR.

Fuente: Propia.



Gráfica. 3. Curva de compactación.

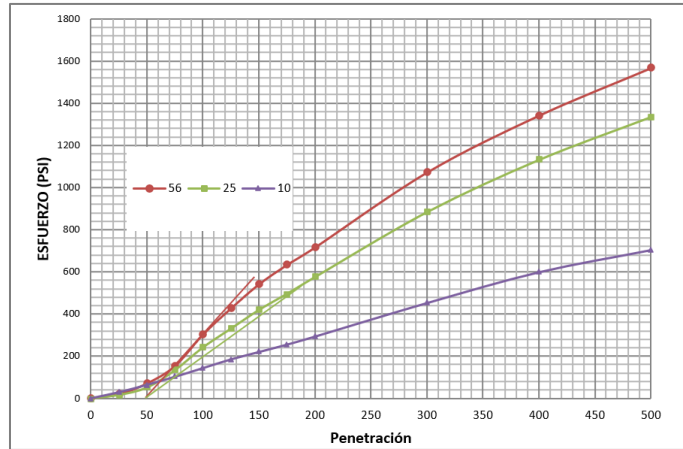
Fuente: Propia.

Las curvas esfuerzo–penetración muestran un aumento sistemático del esfuerzo resistente con la compactación. A 0,1” se obtuvieron CBR = 53%, 40% y 15%, y a 0,2” CBR = 59%, 48% y 20%; conforme al criterio de la norma INVÍAS INV E-148-13 (CBR), cuando el valor a 0,2” resulta mayor que el de 0,1” debe repetirse el ensayo (ensayo de comprobación) y, si el resultado es consistente, se adopta el CBR a 0,2” como valor reportado. En este caso, el ensayo repetido confirmó nuevamente que 0,2” > 0,1” para las tres energías, por lo que se reportan como CBR representativos 59%, 48% y 20% (a 0,2”). Este comportamiento sugiere un material granular donde, tras la reorganización inicial de partículas, la resistencia se incrementa con la penetración por efecto de fricción e interlock.

Constante del anillo de carga				9,53 Lb/10 ⁻⁴ pl		
	56	25	10	56	25	10
Penetración X 10 ⁻³ pl	Lectura anillo de carga x 10 ⁻⁴ pl.			ESFUERZO (PSI)		
0	0	0	0	0	0	0
25	6	5	9	19	16	29
50	22	16	20	70	51	64
75	48	42	32	152	133	102
100	95	76	45	302	241	143
125	134	104	58	426	330	184
150	170	132	69	540	419	219
175	199	156	80	632	496	254
200	225	181	92	715	575	292
300	337	278	142	1071	883	451
400	422	356	188	1341	1131	597
500	493	420	221	1566	1334	702
%CBR 0,1 pl				53	40	15
%CBR 0,2 pl				59	48	20
%CBR				59	48	20

Tabla 12. Lecturas de carga y cálculo del CBR (penetración–esfuerzo).

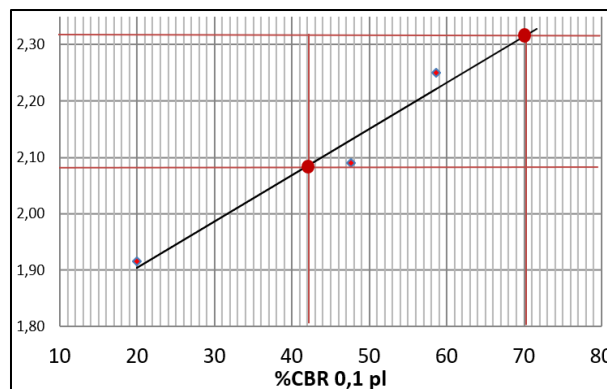
Fuente: Propia.



Gráfica. 4. Curvas esfuerzo-penetración del ensayo CBR (56, 25 y 10 golpes).

Fuente: Propia.

La relación densidad seca-CBR confirma una tendencia creciente: a mayor densidad seca, mayor CBR. Con base en la interpolación presentada, se estiman valores del orden de CBR $\approx 70\%$ para 100% de compactación y CBR $\approx 42\%$ para 90% de compactación, destacando la alta sensibilidad del CBR a la densificación. En síntesis, los resultados indican que el desempeño mecánico de la subbase depende fuertemente del control de compactación (humedad cercana al óptimo y energía adecuada), condición clave para garantizar la capacidad portante y para establecer una línea base frente a la estabilización con RAP.



Gráfica. 5. Relación densidad seca-%CBR.

Fuente: Propia.

CBR 100% COMPACTACION	70%
CBR 90% COMPACTACION	42%

4.1.9. Clasificación de material según invias.

Según los resultados de la caracterización del material granular empleado (sin adición de RAP) evidencia un agregado químicamente durable y con baja presencia de finos plásticos. En resistencia a sulfatos, se reportan pérdidas totales corregidas de 6,0% para la fracción gruesa y 8,4% para la fracción fina, valores que reflejan buena estabilidad frente a procesos de disgregación por ataque químico; de forma consistente, el equivalente de arena promedio es 78%, indicando una fracción fina “limpia” y con escasa contaminación por arcillas o partículas plásticas, condición favorable para desempeño en capas granulares de pavimento.

Característica	Norma de ensayo INV	Subbase granular		
		Clase A	Clase B	Clase C
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%): - 500 revoluciones	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%).	E-238	30	35	-
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%).	E-125	25	25	25
Índice de Plasticidad, máximo (%).	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%).	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%).	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo.	E-148	40	30	30

Nota: se puede validar el requisito de durabilidad, empleando cualquiera de los dos sulfatos indicados.

Tabla 13. Requisitos de los agregados para subbases granulares.

Fuente: INVIAS 2022 Art.320.

En términos de calidad y durabilidad mecánica del agregado, el contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales es prácticamente despreciable (0,10%), lo que sugiere baja probabilidad de generación de finos por desintegración durante compactación o servicio y, por tanto, menor riesgo de pérdida de drenaje interno y de soporte con presencia de agua. De manera complementaria, el ensayo de desgaste en Máquina de Los Ángeles arroja un valor del orden de 18%, interpretado como un comportamiento favorable del agregado frente

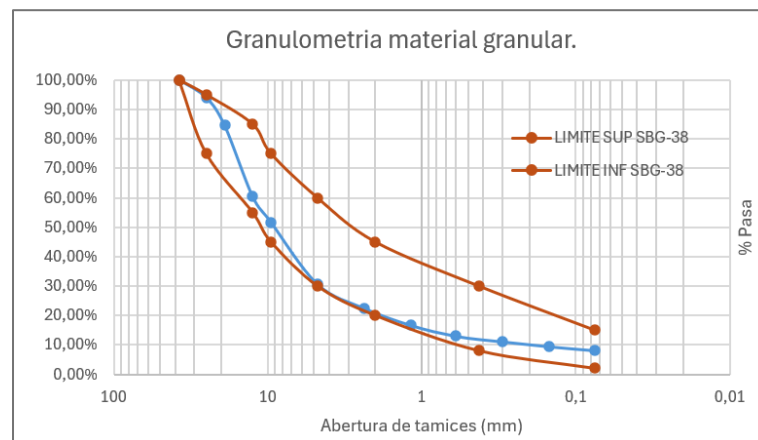
a abrasión/impacto, coherente con un material resistente a la fragmentación y apto para capas granulares.

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)								
	50,0	37,5	25,0	12,5	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	2 Pulgadas	1 ½ Pulgadas	1 Pulgada	1/2 Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
Pasa tamiz (%)									
SBG-50 (Nota)	100	70 – 95	60 – 90	45 – 75	40 – 70	25 – 55	15 – 40	6 – 25	2 – 15
SBG-38 (Nota)	-	100	75 – 95	55 – 85	45 – 75	30 – 60	20 – 45	8 – 30	2 – 15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %				6 %			3 %

Tabla 14. Franjas granulométricas del material granular.

Fuente: INVIAS 2022 Art.320.

Respecto a capacidad portante, el CBR mostró una respuesta fuertemente controlada por la energía de compactación: con humedad de moldeo prácticamente constante ($\approx 5,8-5,9\%$), se obtuvieron densidades secas de 2,25; 2,09 y 1,92 g/cm³ (56, 25 y 10 golpes, respectivamente) y CBR representativos de 59%, 48% y 20%. A partir de la relación densidad seca–CBR se estimaron valores aproximados de CBR $\approx 70\%$ para 100% de compactación y CBR $\approx 42\%$ para 90% de compactación, lo cual confirma que el material puede alcanzar niveles de soporte altos si se asegura control estricto de humedad cercana al óptimo y densificación adecuada.



Gráfica. 6. Granulometría de material granular + límites granulométricos de subbase granular SBG-38.

Fuente: Propia.

Característica	Subbase clase C	Material granular
Dureza(O)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles. Máximo (%)	50	18
Durabilidad(O)		
Pérdida en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)		
-Fracción gruesa (sulfato de sodio)	12	6
-Fracción fina (sulfato de sodio)	12	8,4
Limpieza(F)		
Límite líquido, máximo (%)	25	No líquido
Índice de Plasticidad, máximo (%)	6	No plástico
Equivalente de arena, mínimo (%)	25	78
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	2	0,1
Resistencia del material(F)		
CBR, mínimo (%)	30	70

Tabla 15. Comparativa de los agregados para subbases granulares.

Fuente: Propia.

Para la clasificación conforme a las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (EGCC) de INVÍAS (Art. 320-22), la subbase granular se define por (i) la franja granulométrica de referencia y (ii) la clase (A, B o C), asociada al nivel de tránsito (uso típico: Clase C→NT1, Clase B→NT2 y Clase A→NT3). Con base en la granulometría obtenida, el material presenta una distribución que refleja un material con fracción gruesa y media bien representada, acompañado de un contenido de finos moderado, lo cual es compatible con una gradación utilizada típicamente en capas de subbase, siempre que cumpla simultáneamente con los requisitos de calidad complementarios establecidos por la EGCC (limpieza y plasticidad de finos, entre otros). En términos de clasificación granulométrica, la curva muestra una tendencia acorde con una subbase granular tipo SBG-38, al ajustarse de manera general a la distribución esperada para este tipo de material.

En cuanto al desempeño mecánico, los resultados de laboratorio previamente obtenidos (compactación y CBR) evidencian que la subbase incrementa su capacidad portante con el aumento de densidad seca, alcanzando valores de CBR representativos que superan los umbrales mínimos exigibles para subbase, especialmente bajo condiciones de compactación cercanas a las especificadas en obra. En consecuencia, considerando la coherencia entre la gradación reportada y la respuesta mecánica observada, el material puede describirse como un granular apto para uso como subbase, con una tendencia granulométrica SBG-38 y desempeño portante favorable bajo un control adecuado de humedad y compactación.

4.2. Caracterización del material RAP.

4.2.1. Procedencia del RAP.

El material fresado de pavimento asfáltico (RAP) utilizado en esta investigación provino del fresado de la carpeta asfáltica existente en la Avenida Roosevelt, en el tramo comprendido entre las calles 50 y 56, en la ciudad de Cali, departamento del Valle del Cauca.



Ilustración 4. Zona de procedencia del RAP.

Fuente: Google Earth.

4.2.2. Granulometría.

En esta investigación se realizó el análisis granulométrico del material fresado de pavimento asfáltico (RAP) en su condición inicial, es decir, antes de ser combinado con cualquier otro material. El procedimiento consistió en determinar la distribución de tamaños de partícula mediante tamizado, obteniendo los porcentajes retenidos y pasantes en cada malla, con el fin de caracterizar el RAP como insumo para la estabilización de material granular. Este ensayo se ejecutó siguiendo los métodos establecidos por INVÍAS, particularmente el método INV E-213 (Análisis granulométrico de agregados).

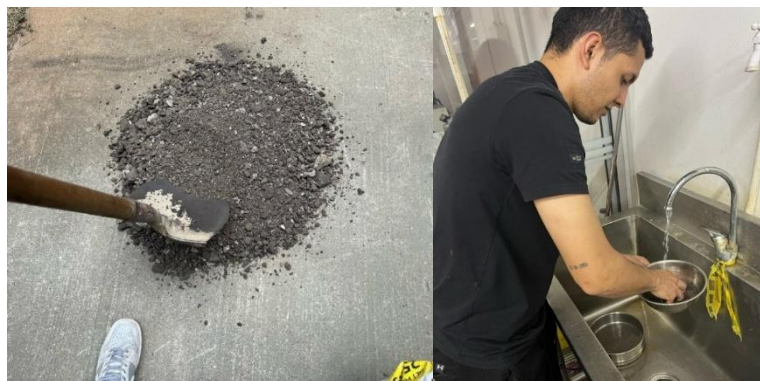


Ilustración 5. Mezcla, cuarteo y lavado de material RAP.

La granulometría del RAP es una etapa fundamental porque permite conocer la condición real del material reciclado y documentar su variabilidad, considerando que su origen (carpeta fresada) puede generar partículas aglomeradas por efecto del ligante asfáltico envejecido. Asimismo, permite evaluar la compatibilidad del RAP con el material granular natural y anticipar la necesidad de cribado, trituración o corrección de la gradación para ajustarse a una curva objetivo. Además, apoya el diseño de las mezclas RAP–granular, dado que la distribución de tamaños influye directamente en la compactación, la densidad seca, la humedad óptima, la trabajabilidad y el desempeño mecánico posterior (por ejemplo, el CBR). Finalmente, establece una base técnica para comparar el comportamiento del RAP en distintas dosificaciones y sustentar su posible aprovechamiento, ya sea en capas estructurales o en alternativas como afirmado y rellenos.

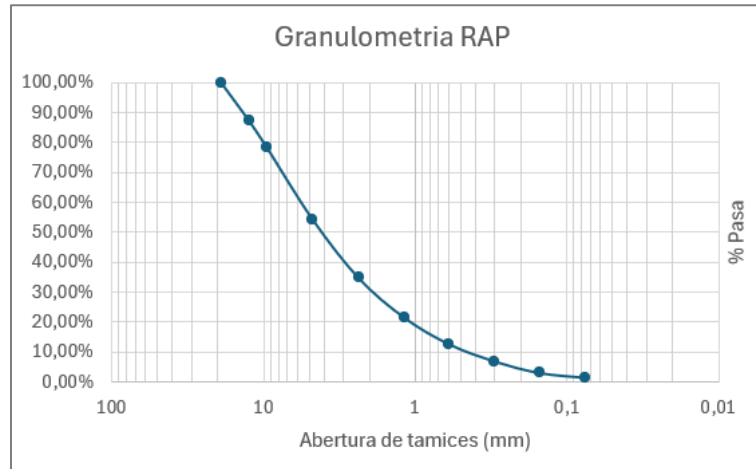
Peso RAP + tara, sin lavar y seco (g)	6287,50	gramos (g)
Peso de tara (g)	297,86	gramos (g)
Peso de RAP + tara, luego de ser lavado y secado (g)	6256,36	gramos (g)
Peso de RAP lavado y secado (g)	5958,5	gramos (g)

GRANULOMETRÍA					
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	%Retenido acumulado	%Pasa
3\4	19	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1\2	12,5	755,50	12,61%	12,61%	87,39%
3\8	9,5	541,00	9,03%	21,65%	78,35%
Nº4	4,75	1436,00	23,97%	45,62%	54,38%
Nº 8	2,36	1173,50	19,59%	65,21%	34,79%
Nº 16	1,18	793,00	13,24%	78,45%	21,55%
Nº 30	0,6	529,50	8,84%	87,29%	12,71%
Nº 50	0,3	348,50	5,82%	93,11%	6,89%
Nº 100	0,15	233,50	3,90%	97,01%	2,99%
Nº 200	0,075	94,18	1,57%	98,58%	1,42%
Fondo		13,94	0,23%	98,81%	1,19%
Total		5918,62	-	-	-

Tabla 16. Granulometría del material reciclado de pavimento asfáltico.

Fuente: Propia.

Adicionalmente, se evaluó la pérdida de material fino por lavado, obteniéndose una disminución de masa de 31,14 g sobre una muestra seca inicial de 5989,64 g, lo que equivale a 0,52%. Este resultado sugiere un bajo contenido de finos lavables en el RAP, aspecto relevante para el control granulométrico y la interpretación del comportamiento de compactación y desempeño mecánico del material.



Gráfica. 7. Granulometría del material reciclado de pavimento asfáltico.

Fuente: Propia.

A partir de los resultados del análisis granulométrico del material fresado de pavimento asfáltico, se observa que el material no presenta sobredimensionado, ya que en el tamiz de 3/4" (19 mm) no se registró masa retenida, evidenciando que el tamaño máximo de las partículas se encuentra por debajo de esta abertura. La distribución de tamaños muestra una tendencia continua, sin cambios abruptos entre tamices, lo cual sugiere una gradación relativamente uniforme y sin vacíos marcados en rangos específicos, característica conveniente para describir el comportamiento del material como un agregado reciclado.

En cuanto a la composición por fracciones, se identificó una concentración importante de material en tamaños intermedios, particularmente entre los tamices No. 4 (4,75 mm) y No. 8 (2,36 mm). En este rango se registran los mayores porcentajes retenidos, destacándose el tamiz No. 4 con aproximadamente 23,97% y el tamiz No. 8 con cerca de 19,59%, lo que indica que el RAP está conformado principalmente por partículas equivalentes a grava fina y arena gruesa. Esta condición es consistente con materiales provenientes de procesos de fresado, donde la remoción del pavimento se realiza con equipos que trituran la carpeta asfáltica, lo

que favorece la fragmentación del agregado y la aparición de tamaños predominantes en rangos de grava fina y arena gruesa (Martínez-Cárdenas et al., s. f., p. 3). Además, se ha reportado que parámetros operativos del fresado (p. ej., profundidad y velocidad) influyen en la granulometría del RAP y pueden aumentar la generación de finos (Puig Salesa, 2021, p. 74).

Al analizar la proporción global de gruesos, arenas y finos, se encuentra que cerca del 45,62% del material corresponde a fracción gruesa (retención acumulada hasta el tamiz No. 4), mientras que la fracción de arena (material entre No. 4 y No. 200) representa aproximadamente 52,96%. Por su parte, el contenido de finos es bajo, con un pasante del tamiz No. 200 (0,075 mm) del orden de 1,42%. Este comportamiento describe un RAP “limpio”, con escasa presencia de partículas finas, aspecto que puede influir en la trabajabilidad y en la respuesta mecánica del material cuando se utilice en mezclas con agregados naturales.

Cuando el RAP presenta bajo contenido de finos (pasa No. 200), su respuesta tiende a asemejarse a la de un material granular “no cohesivo”: la resistencia proviene principalmente de la fricción interna y la cohesión es muy limitada (o “aparente”, asociada a efectos de humedad en los vacíos). En este tipo de materiales, el desempeño puede volverse más sensible al control de humedad y al nivel de compactación, porque la ganancia de rigidez/soporte depende en gran medida de cómo se densifica la estructura granular y de la condición de saturación. (U.S. Army Corps of Engineers, 1992; Theyse, 2002).

En el caso del RAP, además de funcionar como un material granular “normal”, hay un detalle importante: muchas partículas quedan parcial o totalmente cubiertas por una capa de asfalto viejo. Con el tiempo ese ligante se va endureciendo por oxidación, así que no es solo piedra suelta, sino piedra con “recubrimiento” asfáltico envejecido. Esa película puede cambiar la forma en que las partículas se acomodan y se agarran entre sí, y junto con la gradación (incluyendo la cantidad de finos) puede afectar tanto la respuesta mecánica como la sensibilidad a la humedad. Por eso, cuando se busca usar RAP en capas granulares no tratadas donde se necesita buena capacidad de soporte (por ejemplo, para lograr mejores valores de CBR o estabilidad), suele recomendarse procesarlo (tritución/cribado y clasificación) y, muchas veces, mezclarlo con agregado natural para ajustar la gradación y obtener un comportamiento más adecuado para fines estructurales (Chesner et al., 1998; Saeed, 2008).

4.3. Diseño y caracterización del material granular + RAP.

4.3.1. Granulometría.

Los porcentajes de 40% RAP + 60% material granular, 50% RAP + 50% material granular y 60% RAP + 40% material granular se seleccionaron para construir un rango de estudio progresivo y comparable (incrementos de 10%), que permitiera identificar de manera clara la tendencia del comportamiento mecánico del material al aumentar el contenido de RAP. Este enfoque es coherente con recomendaciones técnicas para el uso del RAP en capas granulares no tratadas, donde la variable principal de análisis suele ser la proporción RAP–agregado natural, ya que de esta dependen la gradación final, la compactabilidad y, en general, la capacidad de soporte evaluada mediante ensayos como el CBR. En ese sentido, se recomienda definir el contenido de RAP con base en mezclas representativas y su verificación experimental en laboratorio (Federal Highway Administrativo [FHWA], 1998).

En particular, la mezcla 40/60 se adoptó como un escenario relativamente conservador, en el cual el material granular (caracterizado como subbase) conserva un papel predominante en la estructura granular, facilitando el cumplimiento de curvas granulométricas y manteniendo la resistencia por fricción propia de los agregados naturales. Estudios de laboratorio han reportado desempeños aceptables en mezclas con contenidos cercanos a 40% de RAP cuando se combinan con agregados naturales, especialmente al evaluar parámetros de soporte y comportamiento mecánico (Sultan et al., 2013; Lickachai, 2025).

La mezcla 50/50 se incluyó como punto intermedio por ser una combinación de uso frecuente en evaluaciones técnicas, al representar un balance práctico entre aprovechamiento del material reciclado y aporte del agregado natural. Además, se ha documentado que combinaciones del tipo 50% RAP – 50% agregado natural pueden generar beneficios económicos por sustitución parcial de materiales vírgenes, y también han sido analizadas en términos de desempeño para subbases (Hoppe et al., 2015; Montepara et al., 2012).

Por su parte, la mezcla 60/40 se consideró como un escenario de alto contenido de RAP, con el fin de explorar un umbral de comportamiento que permitiera identificar posibles limitaciones asociadas a gradación, compactación y capacidad de soporte, así como la necesidad de ajustes mediante procesamiento o mezcla. La literatura reporta investigaciones donde se ensayan contenidos elevados de RAP para determinar rangos máximos de aprovechamiento

y su efecto sobre el desempeño mecánico en capas granulares no ligadas (Awed et al., 2020; Ullah, 2021).

Finalmente, no se incluyeron rangos adicionales de mezcla debido a limitaciones en la disponibilidad del RAP empleado en la investigación. El material fresado fue obtenido mediante donación y se contó con un volumen restringido, lo cual redujo la posibilidad de elaborar y ensayar un número mayor de dosificaciones. Adicionalmente, la consecución de RAP con características homogéneas resultó compleja, ya que su obtención depende de actividades de fresado programadas y de la logística de acopio y transporte. Por tanto, se priorizó un conjunto de mezclas representativas (40%, 50% y 60% de RAP) que permitiera cumplir con el diseño experimental y la repetibilidad de los ensayos dentro de los recursos disponibles, manteniendo el enfoque comparativo del estudio.

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	%Pasa SBG	%Pasa RAP	60% SBG	40% RAP	100,0%
1 1/2"	37,5	100,0%	100,0%	60,0%	40,0%	100,0%
1"	25	94,0%	100,0%	56,4%	40,0%	96,4%
3/4"	19	84,6%	100,0%	50,8%	40,0%	90,8%
1/2"	12,5	60,5%	87,4%	36,3%	35,0%	71,2%
3/8	9,5	51,7%	78,4%	31,0%	31,3%	62,4%
Nº 4	4,75	30,7%	54,4%	18,4%	21,8%	40,2%
Nº 8	2,36	22,5%	34,8%	13,5%	13,9%	27,4%
Nº 16	1,18	16,7%	21,5%	10,0%	8,6%	18,7%
Nº 30	0,6	13,0%	12,7%	7,8%	5,1%	12,9%
Nº 50	0,3	11,1%	6,9%	6,7%	2,8%	9,4%
Nº 100	0,15	9,5%	3,0%	5,7%	1,2%	6,9%
Nº 200	0,075	8,1%	1,4%	4,9%	0,6%	5,4%

Tabla 17. Granulometría de mezcla 60% subbase y 40% RAP.

Fuente: Propia.

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	%Pasa SBG	%Pasa RAP	50% SBG	50% RAP	100%
1 1/2"	37,5	100,0%	100,0%	50,0%	50,0%	100,0%
1"	25	94,0%	100,0%	47,0%	50,0%	97,0%
3/4"	19	84,6%	100,0%	42,3%	50,0%	92,3%
1/2"	12,5	60,5%	87,4%	30,2%	43,7%	73,9%
3/8	9,5	51,7%	78,4%	25,9%	39,2%	65,0%
Nº 4	4,75	30,7%	54,4%	15,4%	27,2%	42,5%
Nº 8	2,36	22,5%	34,8%	11,2%	17,4%	28,6%
Nº 16	1,18	16,7%	21,5%	8,4%	10,8%	19,1%
Nº 30	0,6	13,0%	12,7%	6,5%	6,4%	12,9%
Nº 50	0,3	11,1%	6,9%	5,6%	3,4%	9,0%
Nº 100	0,15	9,5%	3,0%	4,7%	1,5%	6,2%
Nº 200	0,075	8,1%	1,4%	4,1%	0,7%	4,8%

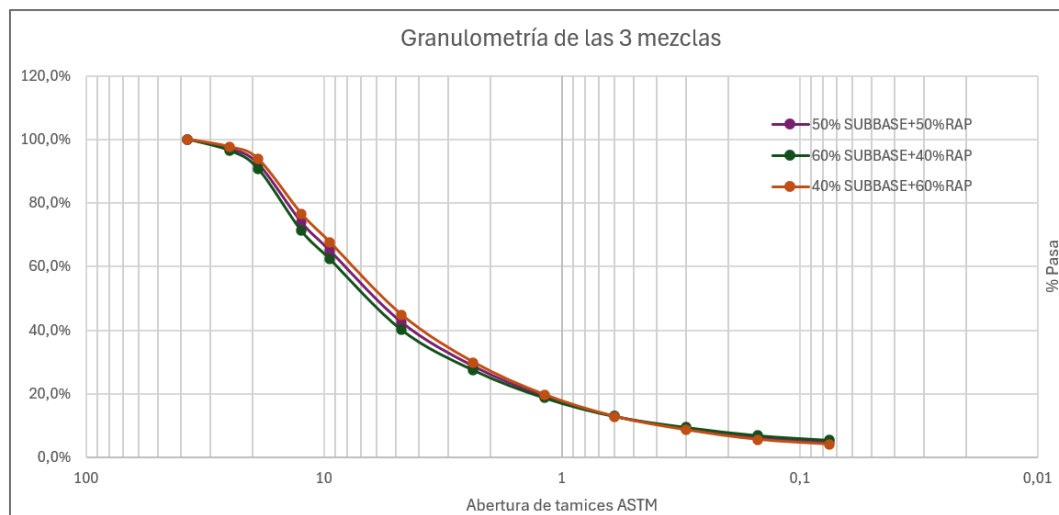
Tabla 18. Granulometría de mezcla 50% subbase y 50% RAP.

Fuente: Propia.

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	%Pasa SBG	%Pasa RAP	40% SBG	60% RAP	100,0%
1 1/2"	37,5	100,0%	100,0%	40,0%	60,0%	100,0%
1"	25	94,0%	100,0%	37,6%	60,0%	97,6%
3/4"	19	84,6%	100,0%	33,8%	60,0%	93,8%
1/2"	12,5	60,5%	87,4%	24,2%	52,4%	76,6%
3/8	9,5	51,7%	78,4%	20,7%	47,0%	67,7%
N°4	4,75	30,7%	54,4%	12,3%	32,6%	44,9%
N° 8	2,36	22,5%	34,8%	9,0%	20,9%	29,9%
N° 16	1,18	16,7%	21,5%	6,7%	12,9%	19,6%
N° 30	0,6	13,0%	12,7%	5,2%	7,6%	12,8%
N° 50	0,3	11,1%	6,9%	4,5%	4,1%	8,6%
N° 100	0,15	9,5%	3,0%	3,8%	1,8%	5,6%
N° 200	0,075	8,1%	1,4%	3,2%	0,9%	4,1%

Tabla 19. Granulometría de mezcla 40% subbase y 60% RAP.

Fuente: Propia.



Gráfica. 8. Curva granulométrica de las 3 mezclas de diseño.

Fuente: Propia.

Las tres dosificaciones (60% SB–40% RAP, 50%–50% y 40% SB–60% RAP) presentan una gradación continua y sin presencia de material sobredimensionado, con 100% pasante en 1½" (37,5 mm) y porcentajes pasantes cercanos al 100% en 1"–3/4". En general, la curva resultante de cada mezcla se ubica entre las curvas de sus componentes, como es esperable en un mezclado por ponderación, manteniendo un comportamiento predominantemente granular (grava–arena).

Al incrementar el contenido de RAP, se observa un ligero aumento del material pasante en tamices intermedios. Esto indica que el RAP, en este caso, tiende a aportar mayor fracción en tamaños intermedios, haciendo la mezcla levemente más “fina” en ese rango.

En contraste, el contenido de finos (pasante #200) se mantiene bajo en todas las mezclas y disminuye a medida que aumenta el RAP. En conjunto, las tres curvas corresponden a mezclas con baja fracción fina, lo cual es relevante para interpretar su compactación, drenaje y respuesta mecánica posterior.

4.3.2. Proctor modificado.

Para la caracterización del material mezclado (RAP–material granular tipo subbase) se ejecutó el ensayo Proctor Modificado con el fin de establecer la relación humedad–peso unitario seco y, a partir de ella, determinar la humedad óptima de compactación (C.O.H) y la densidad seca máxima ($\gamma_{d_{\max}}$) de cada dosificación. Estos parámetros constituyen la base para definir condiciones de compactación reproducibles en laboratorio y para orientar el control de calidad de la compactación del material en aplicaciones de tipo granular (p. ej., capas de subbase/afirmado o rellenos estructurales), al permitir comparar el desempeño de las mezclas bajo un mismo criterio energético de compactación.

El procedimiento se desarrolló conforme a la normatividad INVÍAS aplicable al Proctor Modificado, específicamente la norma INV E-142 (Relación de humedad–peso unitario seco en los suelos; ensayo modificado de compactación), empleada por INVÍAS como referencia para obtener el peso unitario seco máximo del material y, adicionalmente, para la determinación de la humedad óptima asociada a la compactación.

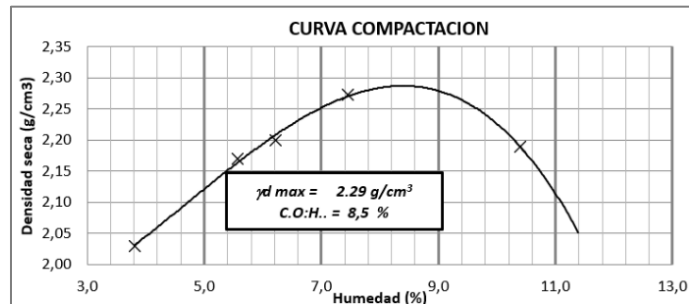
4.3.2.1. Proctor modificado para mezcla 60% material granular y 40% RAP.

A continuación, se presentan los datos obtenidos para la mezcla conformada por 60% material granular y 40% RAP.

DATOS DE ENSAYO					
Punto No.	1	2	3	4	5
No. de golpes	56	56	56	56	56
No. de Capas	5	5	5	5	5
Peso molde + muestra húmeda	9977	10370	10469	10696	10641
Peso Molde	5468	5468	5468	5468	5467,5
Peso de la muestra húmeda	4510	4903	5002	5228	5174
Humedad (Horno)	3,8	5,6	6,2	7,5	10,4
Peso de la muestra seca	4344	4644	4708	4865	4687
Volumen de la muestra	2140	2140	2140	2140	2140
Densidad de la muestra Seca	2,03	2,17	2,20	2,27	2,19
HUMEDAD					
Peso recipiente + suelo húmedo	543,0	842,0	723,0	973,5	1128
Peso recipiente + suelo seco	525,0	801,0	684,0	911,5	1028
Peso recipiente	52,0	64,0	57,5	80,0	66
Humedad (Horno)	3,8	5,6	6,2	7,5	10,4

Tabla 20. Datos de ensayo y cálculos del Proctor Modificado (humedad y densidad seca).

Fuente: Propia.



Gráfica. 9. Curva de compactación, densidad seca vs humedad.

Fuente: Propia.

Para la mezcla 60% material granular + 40% RAP, el Proctor Modificado evidencia un comportamiento típico: la densidad seca aumenta con la humedad hasta un máximo y luego disminuye al sobrepasar el óptimo. En los puntos ensayados la densidad seca pasó de 2,03 g/cm³ a 3,8% de humedad hasta valores cercanos a 2,27 g/cm³ alrededor de 7,5%, y después bajó a 2,19 g/cm³ cuando la humedad subió a 10,4%, indicando exceso de agua.

La curva de compactación permite estimar una densidad seca máxima ($\gamma_{d\text{máx}}$) de 2,29 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad (C.O.H) de aproximadamente 8,5%. La diferencia entre el máximo puntual (2,27 g/cm³) y el máximo de la curva es normal, ya que la curva representa la tendencia general.

En términos prácticos, estos resultados muestran que la mezcla tiene buena capacidad de compactación y que, para obtener el mejor desempeño, conviene compactarla cerca del C.O.H (~8,5%), donde se logra la mayor densificación y, en general, mejores condiciones para ensayos de soporte como el CBR.

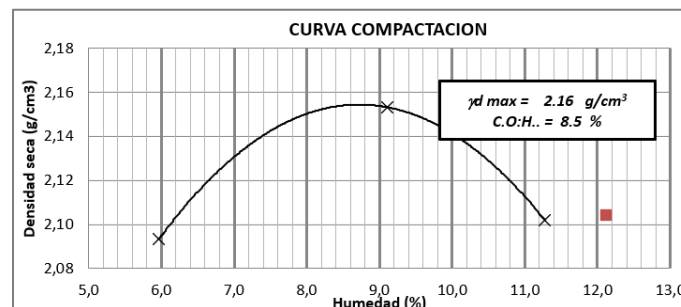
4.3.2.2. Proctor modificado para mezcla 50% material granular y 50% RAP.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la mezcla conformada por 50% RAP y 50% material granular (subbase).

DATOS DE ENSAYO				
Punto No.	1	2	3	4
No. de golpes	56	56	56	56
No. de Capas	5	5	5	5
Peso molde + muestra húmeda	10214	10495	10473	10516
Peso Molde	5468	5468	5468	5468
Peso de la muestra húmeda	4747	5028	5006	5049
Humedad (Horno)	6,0	9,1	11,3	12,1
Peso de la muestra seca	4479	4608	4498	4502
Volumen de la muestra	2140	2140	2140	2140
Densidad de la muestra Seca	2,09	2,15	2,10	2,10
HUMEDAD				
Peso recipiente + suelo húmedo	387,3	592,2	435,6	594,6
Peso recipiente + suelo seco	368,8	548,9	397,7	537,0
Peso recipiente	59,0	73,5	61,5	62,4
Humedad (Horno)	6,0	9,1	11,3	12,1

Tabla 21. Datos de ensayo y cálculos del Proctor Modificado (humedad y densidad seca).

Fuente: Propia.



Gráfica. 10. Curva de compactación, densidad seca vs humedad.

Fuente: Propia.

Para la mezcla 50% RAP + 50% material granular, el ensayo Proctor Modificado evidenció el comportamiento típico de compactación: la densidad seca aumenta con el incremento de la humedad hasta alcanzar un máximo y, posteriormente, disminuye al superar el contenido óptimo. En los puntos evaluados se obtuvo una densidad seca de 2,09 g/cm³ para 6,0% de humedad, y el mayor valor medido fue 2,15 g/cm³ alrededor de 9,1%, lo que indica una condición cercana al óptimo. Al aumentar la humedad a 11,3%, la densidad seca disminuyó a 2,10 g/cm³, confirmando que el material entra en la rama húmeda, donde el exceso de agua dificulta la expulsión de aire y reduce la eficiencia de compactación.

En este conjunto de resultados, se descartó el punto 4 (12,1% de humedad) debido a que mostró un comportamiento inusual respecto a la tendencia general esperada, al no reflejar de manera consistente la variación de densidad seca en la zona de altas humedades. Este tipo de desviaciones puede asociarse a factores operativos como variaciones en el moldeo, pérdida o ganancia de humedad durante el proceso, diferencias en el manejo de la muestra o posibles inconsistencias en el secado y determinación de humedad. En consecuencia, para la interpretación y ajuste de la curva se priorizaron los puntos que presentaron un comportamiento coherente con la forma teórica de la curva Proctor.

A partir de la curva de compactación se estimó una densidad seca máxima ($\gamma_{d\text{máx}}$) de 2,16 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad (C.O.H) cercano a 8,5%, valores que concuerdan con el máximo observado en los datos y con la tendencia general de la mezcla. En comparación con la dosificación 60% material granular – 40% RAP, esta mezcla presentó una $\gamma_{d\text{máx}}$ menor, lo que sugiere que el incremento de RAP reduce en cierta medida la capacidad de densificación bajo la misma energía de compactación, posiblemente por la presencia de partículas recubiertas con ligante envejecido y por cambios en la estructura de contacto entre granos. No obstante, el C.O.H se mantiene en un rango similar, indicando que el requerimiento de agua para llegar a una condición óptima no varía de forma significativa entre ambas dosificaciones.

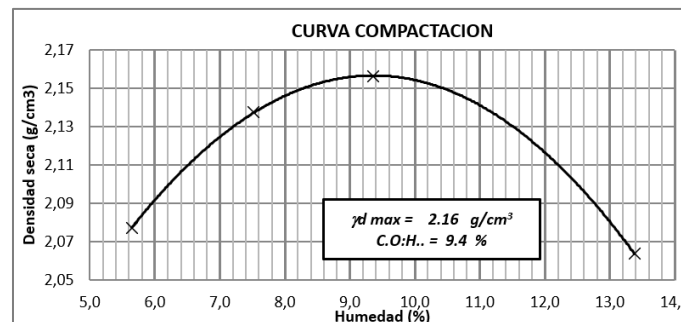
4.3.2.3. Proctor modificado para mezcla 40% material granular y 60% RAP.

Los datos obtenidos para la mezcla conformada por 40% material granular (subbase) y 60% RAP son los siguientes.

DATOS DE ENSAYO				
Punto No.	1	2	3	4
No. de golpes	56	56	56	56
No. de Capas	5	5	5	5
Molde No.	1	1	1	1
Peso molde + muestra húmeda	10164	10386	10514	10475
Peso Molde	5468	5468	5468	5468
Peso de la muestra húmeda	4697	4919	5047	5008
Humedad (Horno)	5,6	7,5	9,4	13,4
Peso de la muestra seca	4445	4575	4615	4417
Volumen de la muestra	2140	2140	2140	2140
Densidad de la muestra Seca	2,08	2,14	2,16	2,06
HUMEDAD				
Peso recipiente + suelo húmedo	383,6	500,7	550,3	634,0
Peso recipiente + suelo seco	366,4	468,3	508,2	566,2
Peso recipiente	61,3	36,5	58,3	59,0
Humedad (Horno)	5,6	7,5	9,4	13,4

Tabla 22. Datos de ensayo y cálculos del Proctor Modificado (humedad y densidad seca).

Fuente: Propia.



Gráfica. 11. Curva de compactación, densidad seca vs humedad.

Fuente: Propia.

El Proctor Modificado desarrolla un comportamiento esperado, ya que la densidad seca incrementó con el aumento de la humedad hasta alcanzar un máximo y posteriormente disminuyó al entrar en la zona húmeda. En los puntos ensayados se obtuvo una densidad seca de 2,08 g/cm³ para 5,6% de humedad, aumentando a 2,14 g/cm³ a 7,5% y alcanzando el mayor valor medido de 2,16 g/cm³ a 9,4%; al incrementar la humedad hasta 13,4%, la densidad seca descendió a 2,06 g/cm³, lo cual confirma que el exceso de agua reduce la eficiencia de compactación.

La curva de compactación permite identificar con claridad una densidad seca máxima ($\gamma_{d_{\text{máx}}}$) de 2,16 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad (C.O.H) de aproximadamente 9,4%, coherentes con el máximo observado en los datos. En términos físicos, el aumento de densidad hasta el C.O.H se asocia a que el agua facilita el reacomodo y la reducción de vacíos durante la compactación; sin embargo, al superar dicho contenido, el agua ocupa parte de los poros e impide la expulsión efectiva de aire, generando una disminución de la densidad seca.

Comparativamente, frente a la mezcla 50/50, esta dosificación mantiene una $\gamma_{d_{\text{máx}}}$ similar ($\approx 2,16$ g/cm³), pero presenta un COH mayor, lo que sugiere que al incrementar el contenido de RAP la mezcla requiere más humedad para alcanzar su condición óptima de compactación. Asimismo, al compararla con la mezcla 60/40, se observa una tendencia general de disminución en la densificación máxima al aumentar el RAP, lo cual puede estar asociado a cambios en la estructura de contacto entre partículas y al efecto del ligante asfáltico envejecido adherido al RAP.

En los tres diseños de mezcla se observó un comportamiento común en el último punto (correspondiente a humedades altas): durante el proceso de compactación afloraba agua en la superficie de la probeta y se evidenciaba una mezcla “sobrehidratada”. Esta respuesta es consistente con la rama húmeda de la curva Proctor, donde el exceso de agua ocupa parte de los vacíos, dificulta la expulsión de aire y reduce la eficiencia de densificación, lo que finalmente se refleja en la disminución de la densidad seca para esos puntos de alta humedad.

En estas dosificaciones, un factor complementario proviene del ligante asfáltico residual. La literatura reporta que el RAP tiende a comportarse como un material marcadamente hidrofóbico y con buena capacidad de drenaje, debido al recubrimiento asfáltico sobre las partículas; además, dicho recubrimiento reduce la absorción de agua del agregado y, por tanto, disminuye la capacidad del material para “retener” humedad dentro de su estructura. En consecuencia, cuando se trabaja con humedades altas durante la compactación, parte del agua puede no integrarse al sistema de vacíos y tender a drenar o aflorar bajo la energía de compactación, lo que coincide con lo observado en el último punto de las tres mezclas. (Hoppe et al., 2015; Edil et al., 2009).

4.3.3. CBR.

Posteriormente a la determinación de la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad mediante el ensayo Proctor Modificado, se procedió a ejecutar el ensayo CBR para las tres dosificaciones estudiadas (60% material granular–40% RAP, 50%–50% y 40%–60%), con el fin de evaluar su capacidad de soporte bajo condiciones controladas de compactación y humedad de moldeo. El Proctor Modificado se realizó conforme a la norma INVÍAS INV E-142-13 (Relaciones humedad–peso unitario seco; ensayo modificado de compactación), y el CBR se desarrolló de acuerdo con la norma INVÍAS INV E-148-13 (CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada), considerando el registro de carga–penetración y la determinación del índice CBR en las penetraciones especificadas por el método. Adicionalmente, en concordancia con el criterio establecido en INV E-148-13 para los casos en que el CBR a 0,2” resulte mayor que el CBR a 0,1”, se efectuó la repetición del ensayo (ensayo de comprobación) para cada dosificación; en todos los casos se confirmó nuevamente que el CBR a 0,2” fue superior al de 0,1”, por lo cual el valor reportado y utilizado para el análisis correspondió al CBR determinado a 0,2”.

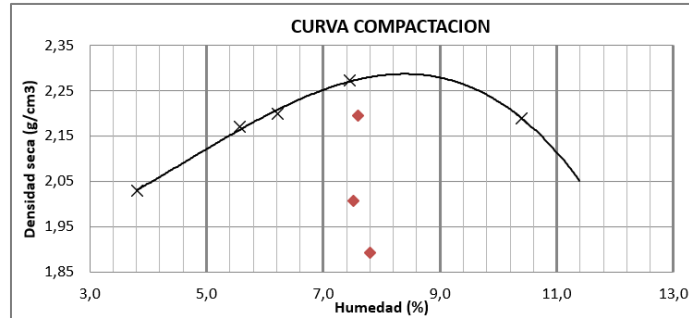
4.3.3.1. CBR para mezcla 60% material granular y 40% RAP.

El desarrollo del ensayo CBR se inició con la mezcla conformada por 60% material granular (subbase) y 40% RAP, a partir de la cual se evaluó su capacidad de soporte bajo las condiciones definidas previamente mediante el Proctor Modificado.

DATOS DE ENSAYO			
Punto No.	1	2	3
No. de golpes	56	25	10
No. de Capas	5	5	5
Molde No.	72	52	5
Peso molde + muestra húmeda	10072	13464	11899
Peso Molde	4519	8395	7106
Peso de la muestra húmeda	5553	5069	4793
Humedad (Horno)	7,6	7,5	7,8
Peso de la muestra seca	5160	4715	4446
Volumen de la muestra	2350	2350	2350
Densidad de la muestra Seca	2,20	2,01	1,89
HUMEDAD			
Peso recipiente + suelo húmedo	423,9	446,3	470,1
Peso recipiente + suelo seco	398,4	419,8	441,1
Peso recipiente	63,5	67,6	68,7
Humedad (Horno)	7,6	7,5	7,8

Tabla 23. Datos de compactación y humedad para el ensayo CBR.

Fuente: Propia.



Gráfica. 12. Curva de compactación.

Fuente: Propia.

Para la primera mezcla (60% material granular + 40% RAP), los datos de preparación de probetas para el CBR evidencian tres niveles de energía de compactación (56, 25 y 10 golpes, en 5 capas) con humedades muy similares entre sí (7,5%–7,8%), lo cual es positivo porque permite comparar el efecto de la compactación sin que la humedad sea una variable dominante. Bajo estas condiciones, la densidad seca disminuye de manera marcada al reducir la energía: se obtuvo 2,20 g/cm³ para 56 golpes, 2,01 g/cm³ para 25 golpes y 1,89 g/cm³ para 10 golpes, mostrando que la mezcla es sensible a la energía aplicada y que el grado de compactación controla directamente la densificación alcanzada.

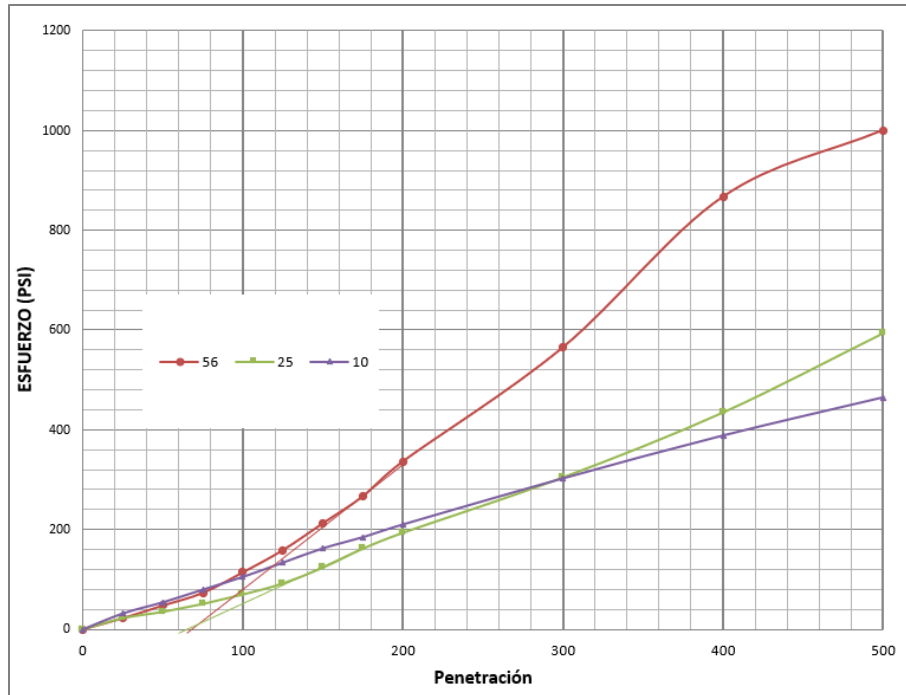
Al contrastar estos resultados con la curva de compactación Proctor Modificado previamente obtenida para esta dosificación, se aprecia que la humedad de moldeo utilizada en CBR ($\approx 7,6\%$) se encuentra cercana al entorno del óptimo (del orden de 8–9%), por lo que las variaciones de densidad seca observadas se explican principalmente por el grado de compactación y no por desviaciones fuertes de humedad. En la práctica, esto sugiere que la probeta compactada con 56 golpes representa una condición más cercana a la densificación máxima del material, mientras que las probetas de 25 y 10 golpes reproducen estados con mayor contenido de vacíos, lo cual normalmente se traduce en menores valores de soporte.

Constante del anillo de carga				9,53 Lb/10 ⁻⁴ pl		
	56	25	10	56	25	10
Penetración X 10 ⁻³ pl	Lectura anillo de carga x 10 ⁻⁴ pl.			ESFUERZO (PSI)		
0	0	0	0	0	0	0
25	7	7	10	22	22	32
50	15	11	17	48	35	54
75	23	16	25	73	51	79
100	36	22	33	114	70	105
125	50	29	42	159	92	133
150	67	39	51	213	124	162
175	84	51	58	267	162	184
200	106	61	66	337	194	210
300	178	96	95	565	305	302
400	273	137	122	867	435	388
500	315	187	146	1001	594	464
%CBR 0,1 pl				24	14	10
%CBR 0,2 pl				32	17	14
%CBR				32	17	14

Tabla 24. Lecturas de carga y cálculo del CBR (penetración–esfuerzo).

Fuente: Propia.

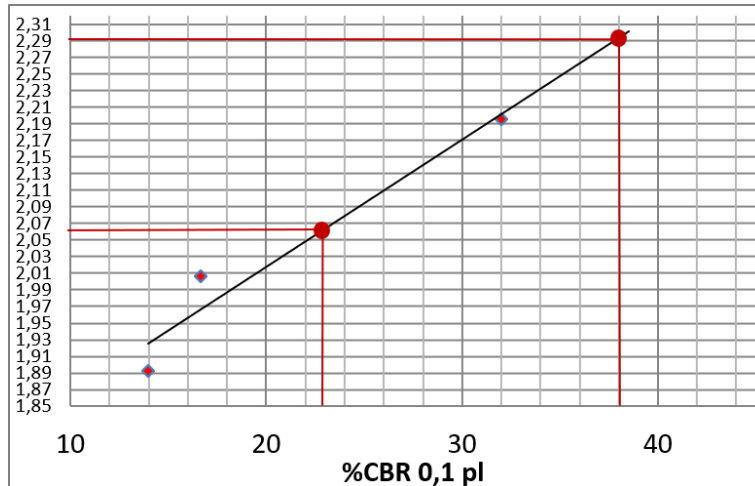
Para la primera mezcla (60% material granular + 40% RAP), el ensayo CBR evidenció una respuesta coherente con el efecto de la energía de compactación sobre la capacidad de soporte. Con humedades de moldeo muy similares (7,5–7,8%), la variación del comportamiento se atribuye principalmente al grado de densificación alcanzado en cada probeta. En efecto, al aumentar la energía (56 golpes) se obtuvo una mayor densidad seca y, en consecuencia, una mayor resistencia a la penetración, mientras que al disminuir la energía (25 y 10 golpes) el material presentó menores esfuerzos para las mismas penetraciones, lo cual es consistente con una estructura interna con mayor contenido de vacíos.



Gráfica. 13. Curvas esfuerzo–penetración del ensayo CBR (56, 25 y 10 golpes).

Fuente: Propia.

Las curvas esfuerzo–penetración muestran el orden esperado: la probeta compactada con 56 golpes desarrolla los mayores esfuerzos a lo largo de todo el rango de penetración (por ejemplo, a 500×10^{-3} pl alcanza aproximadamente 1001 psi), seguida por 25 golpes (594 psi) y 10 golpes (464 psi). En la determinación del índice, se observa que los valores a 0,2 pl resultaron superiores a los de 0,1 pl para las tres energías, por lo que el CBR representativo quedó controlado por 0,2 pl: para 56 golpes se obtuvo CBR = 32%, para 25 golpes CBR = 17% y para 10 golpes CBR = 14%. Esta diferencia ($0,2 > 0,1$) suele presentarse cuando en las primeras penetraciones hay efectos de acomodación inicial del material, y confirma que el soporte mejora de forma marcada cuando se incrementa la compactación.



Gráfica. 14. Relación densidad seca–%CBR.

Fuente: Propia.

CBR 100% COMPACTACION	38%
CBR 90% COMPACTACION	23%

La gráfica de correlación entre densidad seca y CBR confirma esta tendencia: a densidades más altas se asocian mayores CBR, con un comportamiento aproximadamente creciente dentro del rango evaluado. A partir de dicha correlación se estimó un CBR equivalente al 100% de compactación ($\gamma_{d\text{máx}}$ de 2,29 g/cm³) de 38% y un CBR al 90% de compactación de 23%, lo que indica que una reducción relativamente moderada del nivel de compactación se traduce en una disminución apreciable de la capacidad de soporte. En términos prácticos, para esta mezcla el desempeño queda fuertemente condicionado por el control de compactación en campo, siendo crítico alcanzar niveles cercanos al óptimo para aprovechar su potencial resistente.

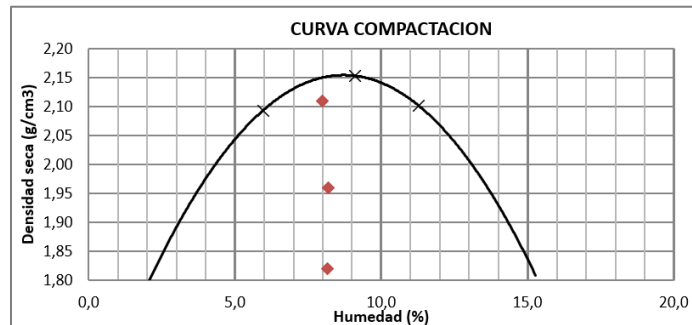
4.3.3.2. CBR para mezcla 50% material granular y 50% RAP.

Para la mezcla 50/50 los resultados se observan a continuación.

DATOS DE ENSAYO			
Punto No.	1	2	3
No. de golpes	56	25	10
No. de Capas	5	5	5
Molde No.	52	87	5
Peso molde + muestra húmeda	9736	9246	11731
Peso Molde	4381	4262	7105
Peso de la muestra húmeda	5355	4984	4626
Humedad (Horno)	8,0	8,2	8,2
Peso de la muestra seca	4958	4607	4277
Volumen de la muestra	2350	2350	2350
Densidad de la muestra Seca	2,11	1,96	1,82
HUMEDAD			
Peso recipiente + suelo húmedo	443,4	463,5	515,0
Peso recipiente + suelo seco	414,9	432,8	479,1
Peso recipiente	58,9	58,3	38,0
Humedad (Horno)	8,0	8,2	8,2

Tabla 25. Datos de compactación y humedad para el ensayo CBR.

Fuente: Propia.



Gráfica. 15. Curva de compactación.

Fuente: Propia.

Para la mezcla 50% RAP + 50% material granular, la preparación de probetas para el ensayo CBR se realizó con tres niveles de energía de compactación (56, 25 y 10 golpes, en 5 capas) manteniendo una humedad prácticamente constante entre 8,0% y 8,2%. Esta condición es favorable porque permite interpretar que las diferencias observadas en el comportamiento del material se deben principalmente al grado de compactación y no a variaciones significativas de humedad.

Los resultados muestran una disminución marcada de la densidad seca a medida que se reduce la energía aplicada: para 56 golpes se obtuvo 2,11 g/cm³, para 25 golpes 1,96 g/cm³ y para 10 golpes 1,82 g/cm³. Al comparar estos valores con el Proctor Modificado de la misma mezcla ($\gamma_{d\text{máx}} \approx 2,16$ g/cm³ y C.O.H $\approx 8,5\%$), se evidencia que las probetas fueron moldeadas cerca del óptimo de humedad y que el espécimen de 56 golpes alcanzó una densificación alta ($\approx 98\%$ de $\gamma_{d\text{máx}}$), mientras que el de 25 golpes se ubicó alrededor de 91% y 10 golpes cerca de 84%, reflejando estados con mayor contenido de vacíos.

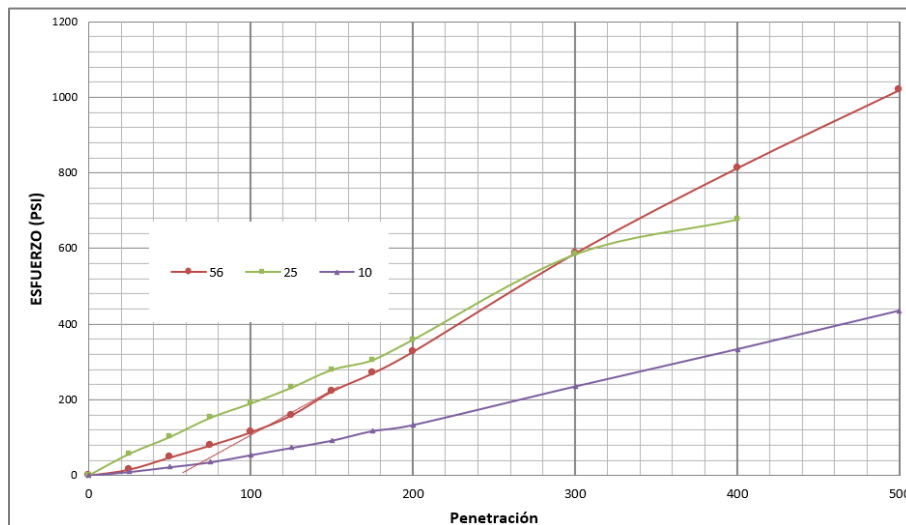
Constante del anillo de carga				9,53 Lb/10 ⁻⁴ pl		
	56	25	10	56	25	10
Penetración X 10 ⁻³ pl	Lectura anillo de carga x 10 ⁻⁴ pl.			ESFUERZO (PSI)		
0	0	0	0	0	0	0
25	5	18	3	16	57	10
50	15	32	7	48	102	22
75	25	48	11	79	152	35
100	36	60	17	114	191	54
125	50	73	23	159	232	73
150	70	88	29	222	280	92
175	85	96	37	270	305	118
200	103	113	42	327	359	133
300	185	184	74	588	585	235
400	256	213	105	813	677	334
500	321		137	1020	0	435
%CBR 0,1 pl				24	19	5
%CBR 0,2 pl				32	24	9
%CBR				32	24	9

Tabla 26. Lecturas de carga y cálculo del CBR (penetración–esfuerzo).

Fuente: Propia.

Para la mezcla 50% RAP + 50% material granular, el ensayo CBR muestra una relación clara entre energía de compactación y capacidad de soporte. Las curvas esfuerzo–penetración evidencian que la probeta compactada con 56 golpes desarrolla los mayores esfuerzos a lo largo del ensayo, alcanzando aproximadamente 1020 psi a la penetración de 500×10⁻³ pl; en contraste, la probeta de 10 golpes presenta los menores esfuerzos (≈ 435 psi a la misma penetración). Para 25 golpes se observan

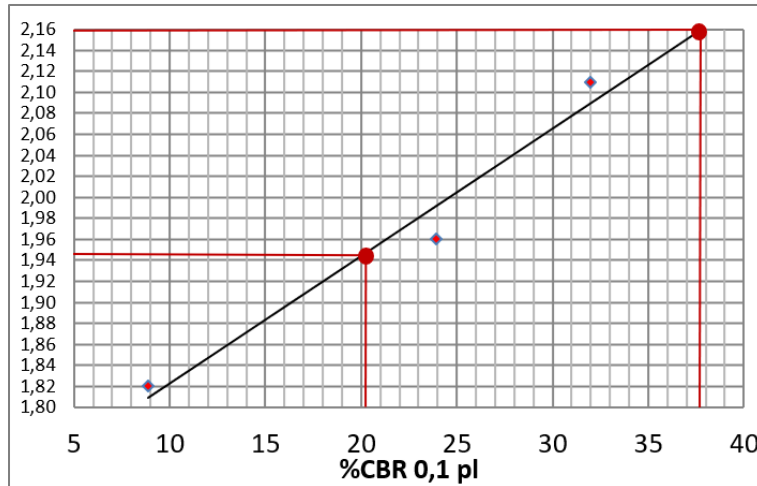
valores intermedios, con esfuerzos superiores a los de 56 golpes en las primeras penetraciones, pero con tendencia a quedar por debajo a penetraciones mayores.



Gráfica. 16. Curvas esfuerzo–penetración del ensayo CBR (56, 25 y 10 golpes).

Fuente: Propia.

En cuanto al índice CBR, los resultados indican que para las tres energías el valor a 0,2 pl es mayor que a 0,1 pl, por lo que el CBR representativo quedó controlado por 0,2 pl: se obtuvo CBR = 32% para 56 golpes, CBR = 24% para 25 golpes y CBR = 9% para 10 golpes. Esta tendencia confirma que la mezcla incrementa su resistencia a la penetración conforme aumenta la densificación, y que reducciones en la compactación generan disminuciones importantes del soporte, especialmente al pasar a la energía más baja (10 golpes).



Gráfica. 17. Relación densidad seca–%CBR.

Fuente: Propia.

CBR 100% COMPACTACION	37,8%
CBR 90% COMPACTACION	20,2%

La correlación entre densidad seca y CBR refuerza lo anterior: a mayor densidad, mayor CBR, mostrando un comportamiento creciente aproximadamente lineal en el rango analizado. A partir de dicha correlación se estimó un CBR equivalente al 100% de compactación de 37,8% y un CBR al 90% de compactación de 20,2%, evidenciando que la mezcla es altamente dependiente del control de compactación. En términos prácticos, estos resultados indican que, para esta dosificación 50/50, alcanzar niveles cercanos al 100% de compactación resulta determinante para obtener capacidades de soporte medias–altas, mientras que compactaciones bajas pueden llevar a desempeños significativamente menores.

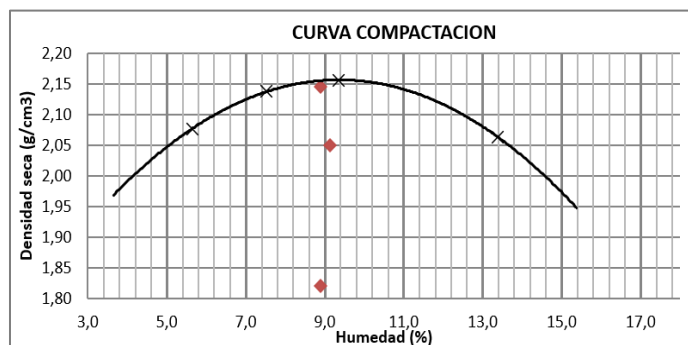
4.3.3.3. CBR para mezcla 40% material granular y 60% RAP.

Por último se realizó el CBR para la mezcla 40% material granular + 60% RAP, cuyos resultados se muestran a continuación.

DATOS DE ENSAYO			
Punto No.	1	2	3
No. de golpes	56	25	10
No. de Capas	5	5	5
Molde No.	87	52	5
Peso molde + muestra húmeda	9751	13145	11766
Peso Molde	4262	7888	7105
Peso de la muestra húmeda	5489	5258	4661
Humedad (Horno)	8,9	9,1	8,9
Peso de la muestra seca	5041	4818	4280
Volumen de la muestra	2350	2350	2350
Densidad de la muestra Seca	2,15	2,05	1,82
HUMEDAD			
Peso recipiente + suelo húmedo	350,0	491,2	563,2
Peso recipiente + suelo seco	325,5	453,2	520,4
Peso recipiente	49,7	36,5	38,4
Humedad (Horno)	8,9	9,1	8,9

Tabla 27. Datos de compactación y humedad para el ensayo CBR.

Fuente: Propia.



Gráfica. 18. Curva de compactación.

Fuente: Propia.

Para la mezcla 40% material granular + 60% RAP, la preparación de probetas para el CBR se realizó con tres niveles de energía de compactación (56, 25 y 10 golpes en 5 capas) manteniendo humedades de moldeo muy cercanas (8,9%–9,1%), lo que permite atribuir las diferencias observadas principalmente al grado de compactación alcanzado; en efecto, la densidad seca disminuyó de manera notable al reducir la energía, pasando de 2,15 g/cm³ (56 golpes) a 2,05 g/cm³ (25 golpes) y hasta 1,82 g/cm³ (10 golpes), lo cual evidencia que con compactaciones bajas la mezcla

conserva mayor contenido de vacíos y menor interbloqueo entre partículas; al contrastar estos valores con la curva de compactación de la misma dosificación, se aprecia que las probetas fueron moldeadas en un rango de humedad cercano al óptimo y que el espécimen de 56 golpes se ubica próximo a la zona de mayor densificación, mientras que los de 25 y, especialmente, 10 golpes quedan por debajo, sugiriendo que el soporte esperado (CBR) estará fuertemente condicionado por la compactación y que, para obtener resultados representativos y comparables, es clave compactar cerca del óptimo y con energías equivalentes.

Constante del anillo de carga				9,53 Lb/10 ⁻⁴ pl		
	56	25	10	56	25	10
Penetración X 10 ⁻³ pl	Lectura anillo de carga x 10 ⁻⁴ pl.			ESFUERZO (PSI)		
0	0	0	0	0	0	0
25	20	15	6	64	48	19
50	46	34	14	146	108	44
75	70	52	25	222	165	79
100	92	66	34	292	210	108
125	114	79	42	362	251	133
150	136	91	51	432	289	162
175	157	104	57	499	330	181
200	180	117	63	572	372	200
300	268	166	93	851	527	295
400	342	207	122	1086	658	388
500	412	249	152	1309	791	483
%CBR 0,1 pl				29	21	11
%CBR 0,2 pl				38	25	13
%CBR				38	25	13

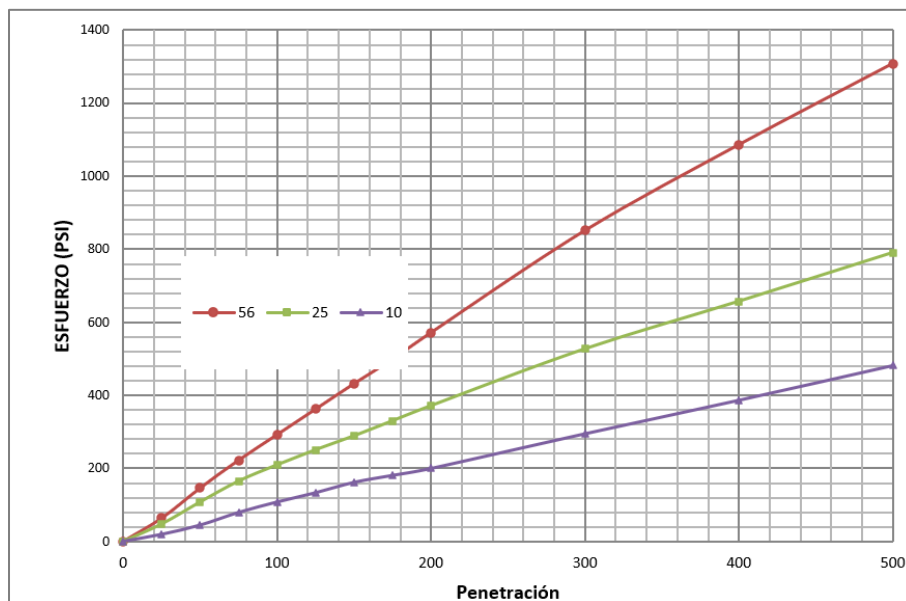
Tabla 28. Lecturas de carga y cálculo del CBR (penetración–esfuerzo).

Fuente: Propia.

Para la mezcla 60% RAP + 40% material granular, el ensayo CBR evidencia una respuesta fuertemente dependiente del nivel de compactación. Las curvas esfuerzo–penetración muestran que la probeta compactada con 56 golpes desarrolla los mayores esfuerzos en todo el rango evaluado, alcanzando aproximadamente 1309 psi a la penetración de 500×10⁻³ pl, mientras que las probetas de 25 y 10 golpes

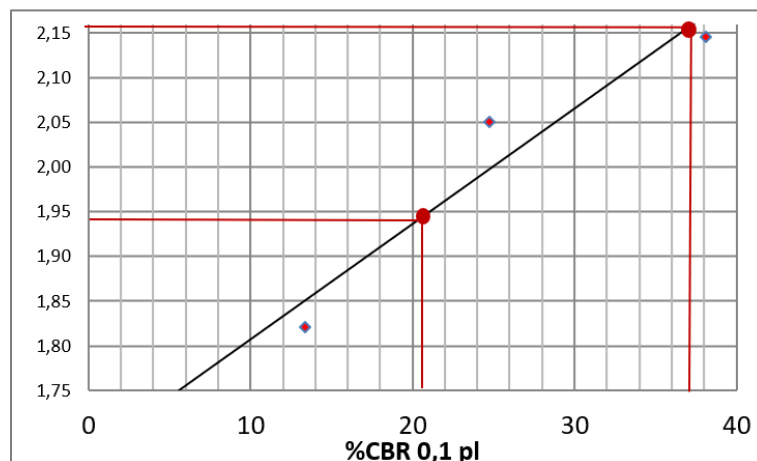
presentan esfuerzos inferiores, del orden de 791 psi y 483 psi, respectivamente, lo que confirma que la reducción de energía disminuye la resistencia a la penetración.

En el cálculo del índice, los valores de CBR a 0,2 pl resultaron superiores a los de 0,1 pl para las tres energías, por lo que el CBR representativo quedó controlado por 0,2 pl. De esta manera, se obtuvieron valores de CBR = 38% para 56 golpes, CBR = 25% para 25 golpes y CBR = 13% para 10 golpes, evidenciando una disminución importante del soporte al reducir la densificación alcanzada en las probetas.



Gráfica. 19. Curvas esfuerzo–penetración del ensayo CBR (56, 25 y 10 golpes).

Fuente: Propia.



Gráfica. 20. Relación densidad seca–%CBR.

Fuente: Propia.

CBR 100% COMPACTACION	37,5%
CBR 90% COMPACTACION	20%

La correlación entre densidad seca y CBR mantiene la tendencia creciente esperada y, a partir de la extrapolación gráfica, se estimó un CBR equivalente al 100% de compactación de 37,5% y un CBR al 90% de compactación de 20%. En conjunto, los resultados indican que esta dosificación puede presentar un desempeño medio–alto cuando se logra una compactación cercana al máximo, pero se deteriora de forma marcada bajo compactaciones bajas; por tanto, el control de humedad y la exigencia de compactación son determinantes para garantizar una respuesta mecánica adecuada.

4.3.4. Comparación de las 3 mezclas.

Al comparar el comportamiento de compactación (Proctor Modificado) de las tres dosificaciones, se observa una tendencia clara: al aumentar el contenido de RAP disminuye la densidad seca máxima y, en la mezcla con mayor RAP, aumenta la humedad óptima. La mezcla 60% material granular–40% RAP presentó la mayor capacidad de densificación, con $\gamma_{d_{\text{máx}}} \approx 2,29 \text{ g/cm}^3$ y COH $\approx 8,5\%$; en cambio, la mezcla 50%–50% alcanzó $\gamma_{d_{\text{máx}}} \approx 2,16 \text{ g/cm}^3$ con COH $\approx 8,5\%$ (descartando el punto final por comportamiento inusual), y la mezcla 40% material granular–60% RAP mantuvo $\gamma_{d_{\text{máx}}} \approx 2,16 \text{ g/cm}^3$ pero con un C.O.H mayor ($\approx 9,4\%$), indicando que, con más RAP, el material requiere ligeramente más humedad para lograr su mejor compactación. En las tres mezclas, el último punto a humedades altas mostró afloramiento de agua durante la compactación, consistente con una condición sobrehumedecida donde se reduce la eficiencia de densificación.

En los resultados de CBR, las tres mezclas mostraron el mismo patrón: la capacidad de soporte crece con la energía de compactación (56 > 25 > 10 golpes), lo cual coincide con los cambios en densidad seca alcanzada en el moldeo. Para 60/40, el CBR fue 32% (56 golpes), 17% (25) y 14% (10); para 50/50, 32%, 24% y 9%; y para 40/60, 38%, 25% y 13%. Esto evidencia que, aunque a alta compactación las mezclas conservan soportes moderados, a compactaciones bajas el desempeño cae de forma marcada, especialmente en la mezcla 50/50, donde el valor a 10 golpes fue el menor.

Al llevar los resultados a un mismo criterio de comparación por grado de compactación, los CBR equivalentes a 100% de compactación resultaron muy similares entre mezclas ($\approx 38\%$ para 60/40; 37,8% para 50/50; 37,5% para 40/60), lo que sugiere que, cuando se controla adecuadamente la compactación, el contenido de RAP en el rango evaluado no cambia de forma drástica la capacidad portante máxima estimada. Sin embargo, a 90% de compactación sí aparecen diferencias: 60/40 alcanzó el mayor valor (23%) frente a 50/50 (20,2%) y 40/60 (20%), indicando que la mezcla con mayor proporción de material granular retiene mejor el soporte cuando la compactación se reduce; en conjunto, los resultados resaltan que el factor más determinante para el desempeño de las tres dosificaciones fue el control de compactación y humedad, más que el porcentaje de RAP por sí solo dentro de los rangos ensayados.

Material	CBR 100% COMPACTACION	CBR 90% COMPACTACION
60% SBG + 40% RAP	38,0	23,0
50% SBG + 50% RAP	37,8	20,2
40% SBG + 60% RAP	37,5	20,0

Tabla 29. Cuadro comparativo de CBR.

Fuente: Propia.

4.3.5. CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS Y POSIBLES USOS.

Para definir los posibles usos de las mezclas RAP–material granular, se emplearon como referencia las tablas de requisitos y criterios de aceptación de INVÍAS para subbase granular Clase C (SBG-38), afirmado y rellenos estructurales (considerando material granular tipo subbase Clase C SBG-38). Con base en estas especificaciones, los resultados obtenidos en laboratorio para cada dosificación (granulometría, compactación y soporte, entre otros) se contrastaron con los parámetros exigidos por norma, con el fin de establecer su nivel de cumplimiento y determinar si las mezclas podían ser viables para cada una de las alternativas planteadas.

4.3.5.1. Como material de subbase.

Característica	Norma de ensayo INV	Subbase granular		
		Clase A	Clase B	Clase C
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%): - 500 revoluciones	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%).	E-238	30	35	-
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%).	E-125	25	25	25
Índice de Plasticidad, máximo (%).	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%).	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%).	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo.	E-148	40	30	30

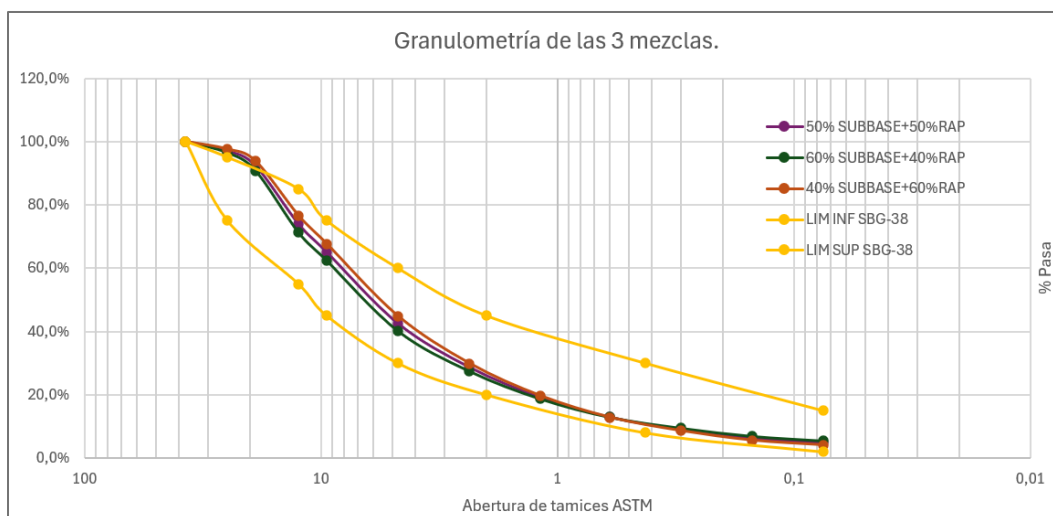
Tabla 30. Requisitos de los agregados para subbases granulares.

Fuente: INVIAS 2022 Art.320.

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)								
	50,0	37,5	25,0	12,5	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	2 Pulgadas	1 ½ Pulgadas	1 Pulgada	1/2 Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
Pasa tamiz (%)									
SBG-50 (Nota)	100	70 — 95	60 — 90	45 — 75	40 — 70	25 — 55	15 — 40	6 — 25	2 — 15
SBG-38 (Nota)	-	100	75 — 95	55 — 85	45 — 75	30 — 60	20 — 45	8 — 30	2 — 15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %				6 %			3 %

Tabla 31. Franjas granulométricas del material granular.

Fuente: INVIAS 2022 Art.320.



Gráfica. 21. Granulometría de las 3 mezclas y límites de material SBG-38.

Fuente: Propia.

Con base en la caracterización realizada, el material granular de cantera cumple con los criterios establecidos por INVÍAS para ser clasificado como subbase granular Clase C dentro de la franja SBG-38. Al incorporar RAP en las proporciones evaluadas, si bien se observa una disminución del soporte medido mediante CBR (valores del orden de 38%), la curva granulométrica de las mezclas se mantiene dentro de los límites definidos para SBG-38, lo cual permite conservar el criterio de clasificación por gradación. En este sentido, la EGCC de INVÍAS establece rangos granulométricos específicos para SBG-38 y, de acuerdo con los resultados obtenidos, las mezclas continúan cumpliendo dichos rangos, por lo que el requisito granulométrico se considera satisfecho. Además, para la subbase Clase C se exige un CBR mínimo de 30% (ensayado conforme al método INVÍAS), de modo que un CBR cercano a 38%, aunque inferior al del material sin RAP, supera el mínimo normativo, respaldando la viabilidad de las mezclas para su uso como subbase Clase C bajo los criterios verificados (INVÍAS, Art. 320 – Subbase granular).

Adicionalmente, se destaca que las mezclas presentan baja fracción fina (pasante tamiz No. 200 reducido), condición típica de materiales predominantemente granulares. Por esta razón, no se ejecutaron los Límites de Atterberg, ya que estos ensayos están orientados a caracterizar la plasticidad de la fracción fina y resultan más representativos cuando existe una proporción significativa de finos cohesivos; en materiales con escaso contenido de finos, los resultados suelen ser no plásticos (NP) o con escasa variación, aportando información limitada frente a los ensayos empleados en este trabajo (granulometría, compactación y CBR), que son los que controlan el desempeño esperado en capas granulares. En consecuencia, y considerando las

restricciones de muestra, tiempo y recursos de laboratorio, el programa experimental se concentró en las pruebas directamente relacionadas con la verificación de la franja SBG-38 y la capacidad de soporte, manteniendo la coherencia con los criterios de aceptación de la subbase granular Clase C establecidos por INVÍAS (INVÍAS, Art. 320 – Subbase granular).

4.3.5.2. Como material de afirmado.

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de Los Ángeles a quinientas (500) revoluciones (Granulometría A), máximo (%): - NT1 - NT2 - NT3	E-218	50 30 30
Durabilidad (O)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18
Limpieza (F)		
Límite líquido, máximo (%).	E-125	35
Índice de Plasticidad (%)	E-125 y E-126	4 – 9
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%).	E-211	2
Contracción lineal.	E-127/E-129	Tabla 311 – 3
Resistencia del material (F)		
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 311.5.2.2.2); el CBR se debe medir sobre muestras sometidas previamente a cuatro días (4 d) de inmersión.	E-148	≥ 15
Nota: la norma de ensayo INV E-220 permite el uso tanto de sulfato de sodio como de sulfato de magnesio, por lo que se admite el uso de cualquiera de los dos componentes químicos.		

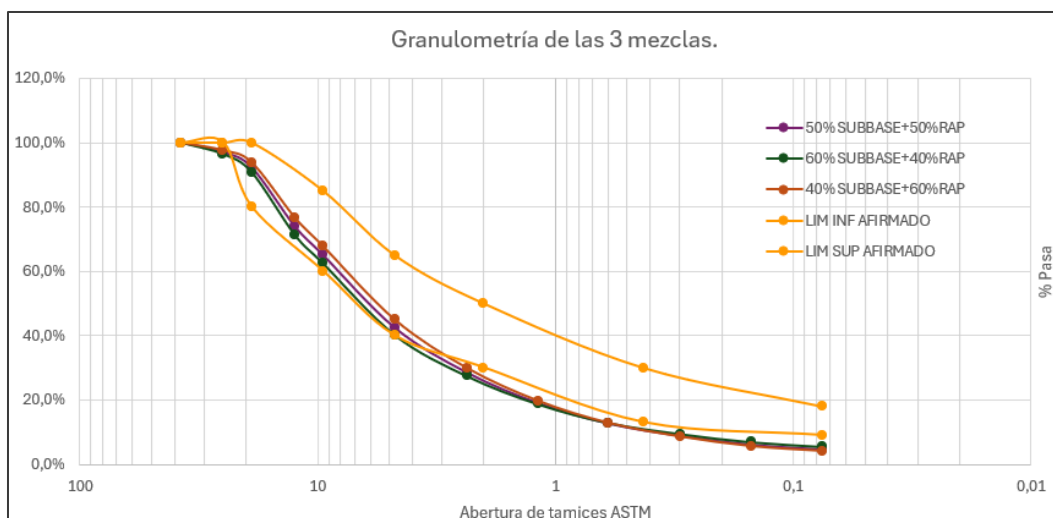
Tabla 32. Requisitos de los agregados para afirmados.

Fuente: INVÍAS 2022 Art.311.

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)							
	37,5	25,0	19,0	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	1 ½ Pulgadas	1 Pulgada	¾ Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
Pasa tamiz (%)								
A-38	100	-	80 – 100	60 – 85	40 – 65	30 – 50	13 – 30	9 – 18
A-25	-	100	90 – 100	65 – 90	45 – 70	35 – 55	15 – 35	10 – 20
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %			3 %

Tabla 33. Franjas granulométricas del material de afirmado.

Fuente: INVÍAS 2022 Art.311.



Gráfica. 22. Granulometría de las 3 mezclas y límites de afirmado.

Fuente: Propia.

Relación	Requisito
$\frac{\% \text{ pasa tamiz nro. 200}}{\% \text{ pasa tamiz No. 10}}$	0,20 – 0,45
$\frac{\% \text{ pasa tamiz nro. 200}}{\% \text{ pasa tamiz No. 40}}$	$\leq 2/3$
$\{(\% \text{ pasa tamiz de 1 pulgada}) - (\% \text{ pasa tamiz nro. 10})\} \times \{ \% \text{ pasa tamiz nro. 4}\}$	16 – 34
$(\% \text{ de contracción lineal}) \times (\% \text{ pasa tamiz nro. 40})$	100 – 240

Tabla 34. Relaciones que debe cumplir el material de afirmado.

Fuente: INVIAS 2022 Art.311.

Cuando la curva granulométrica de las mezclas queda por debajo del límite inferior de la franja exigida para afirmado (gradación A-38), se configura un incumplimiento directo del criterio de gradación establecido por INVÍAS, por lo que el material no debería ser aceptado como afirmado en su estado actual, independientemente de que otros parámetros resulten favorables. En efecto, el Artículo 311 define la franja A-38 mediante rangos de porcentaje que pasa por tamices clave y exige que, durante la construcción, la “Fórmula de Trabajo” se mantenga dentro de la franja adoptada, sin permitir que la curva se salga de los límites ni que se incumplan relaciones complementarias.

Aunque las mezclas presenten un CBR $\approx 38\%$, este valor por sí solo no compensa el incumplimiento granulométrico para afirmado, porque la especificación controla simultáneamente gradación, relaciones entre fracciones y desempeño. De hecho, para afirmado el CBR mínimo exigido es $\geq 15\%$ (medido con inmersión previa de 4 días), por lo que un CBR de 38% sería

suficiente desde el punto de vista de resistencia, pero la aceptación final sigue condicionada al cumplimiento integral de la gradación A-38 y de las relaciones de control , tal como lo establece el Artículo 311.

Desde el comportamiento esperado, una mezcla que cae por debajo del límite inferior de la franja A-38 tiende a ser excesivamente gruesa, con un esqueleto más abierto y potencialmente más propenso a segregación y a dificultades para lograr uniformidad en la capa terminada, lo cual es justamente lo que las especificaciones buscan evitar al exigir gradaciones dentro de banda. En la EGCC se enfatiza que el producto terminado debe ser uniforme y sin segregaciones (criterio que INVÍAS también explicita para capas granulares), reforzando que la gradación no es un requisito “solo de clasificación”, sino un mecanismo de control para la estabilidad y el desempeño en servicio.

En este escenario, existen dos alternativas técnicas: (i) corregir la granulometría mediante ajuste de mezcla (incorporando un material con mayor fracción fina/intermedia) y/o procesamiento del RAP y del agregado (tritución/cribado) hasta lograr que la curva ingrese a la franja A-38; o (ii) descartar el uso como afirmado y orientar las mezclas hacia aplicaciones donde sí cumplan la banda de gradación y los mínimos mecánicos. Esta ruta de corrección y ajuste es consistente con guías de práctica, que señalan que el RAP para usos granulares suele recuperarse, triturarse, cribarse y mezclarse con agregados convencionales para cumplir gradaciones objetivo.

4.3.5.3. Como material de relleno.

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito	
		Tipo SBG	Tipo BG
Dureza (O)			
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - Quinientas (500) revoluciones	E-218	50	40
Durabilidad (O)			
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) (Nota) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18
Limpieza (F)			
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	25
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	6	3
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	25	30
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2	2
Geometría de las Partículas (F)			
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	-	35
Caras fracturadas (una cara), mínimo (%)	E-227	-	50

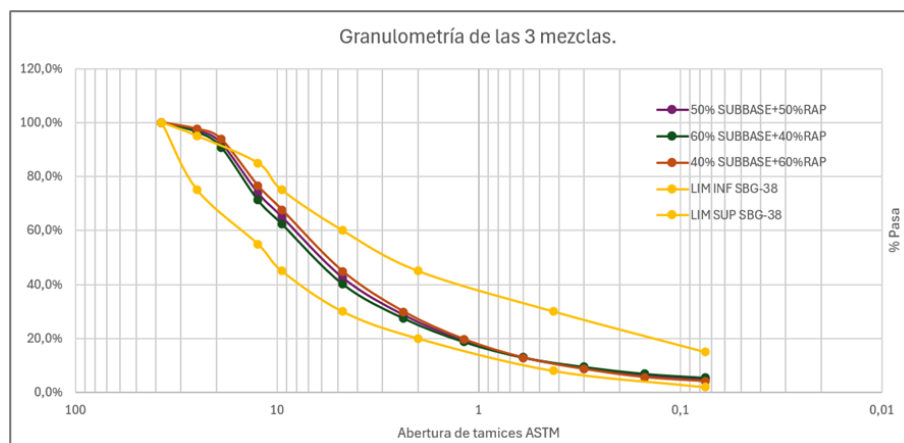
Tabla 35. Requisitos para materiales granulares tipo SBG o BG.

Fuente: INVIAS 2022 Art.610.

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)									
	50,0	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	2 Pulgadas	1 1/2 Pulgadas	1 Pulgada	3/4 Pulgada	1/2 Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
	Pasa tamiz (%)									
SGB-50	100	70 – 95	60 – 90	-	45 – 75	40 – 70	25 – 55	15 – 40	6 – 25	2 – 15
SGB-38	-	100	75 – 95	-	55 – 85	45 – 75	30 – 60	20 – 45	8 – 30	2 – 15
SGB-20	-	-	-	100	60 – 87	50 – 80	35 – 65	24 – 49	8 – 30	2 – 15
BG-38	-	100	70 – 100	-	60 – 90	45 – 75	30 – 60	20 – 45	10 – 30	5 – 15
BG-25	-	-	100	-	70 – 100	50 – 80	35 – 65	20 – 45	10 – 30	5 – 15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %					6 %			3 %

Tabla 36. Franjas granulométricas para materiales granulares tipo SBG o BG.

Fuente: INVIAS 2022 Art.610.



Gráfica. 23. Granulometría de las 3 mezclas y límites de material de relleno.

Fuente: Propia.

Adicionalmente, las mezclas RAP–material granular se evaluaron como material de relleno estructural tipo SBG-38, tomando como referencia el Artículo 610 (Rellenos para estructuras) de INVÍAS, el cual permite emplear materiales granulares tipo SBG por su similitud con la subbase granular NT1 (Artículo 320), siempre que cumplan requisitos de calidad y se ajusten a una franja granulométrica definida. Con base en la granulometría obtenida, las curvas de las mezclas se mantienen dentro de la franja SBG-38 establecida para materiales granulares tipo SBG usados en rellenos, por lo que cumplen el criterio de gradación aplicable a este uso; de forma complementaria, la especificación también controla la proporción de finos mediante la relación $(\% \text{ pasa No.200})/(\% \text{ pasa No.40}) \leq 2/3$, condición coherente con el hecho de que las mezclas presentan bajo contenido de finos. En cuanto a la plasticidad, aunque el Artículo 610 fija para materiales tipo SBG límites de $LL \leq 25$ e $IP \leq 6$, no se realizaron Límites de Atterberg debido a la escasa fracción fina y al comportamiento predominantemente granular observado, por lo que el ensayo resulta poco representativo y suele conducir a condición no plástica; en este marco, se priorizó la verificación de gradación y desempeño mecánico. Finalmente, el $CBR \approx 38\%$ de las mezclas (aunque menor que el del material original) es consistente con un material de subbase Clase C, dado que INVÍAS establece para dicha clase un CBR mínimo de 30% (ensayo INV E-148, con inmersión), lo cual refuerza la argumentación de que las mezclas pueden emplearse como relleno estructural tipo SBG-38 bajo los criterios evaluados.

4.3.6. COMPARACIÓN ECONÓMICA DE SUS POSIBLES USOS.

Se realizó una comparación de costos directos entre las alternativas convencionales de subbase granular Clase C, afirmado y relleno, y las mezclas propuestas con RAP. Para garantizar la comparabilidad, en cada APU se mantuvieron sin cambios los demás insumos (mano de obra, equipos, transporte y actividades asociadas) y únicamente se ajustó el ítem correspondiente al material granular, reduciendo su cantidad según los porcentajes estudiados (60/40, 50/50 y 40/60) e incorporando el RAP como material adicional. En el análisis, el RAP se consideró con costo unitario cero por tratarse de un material donado, por lo que las variaciones en el costo total de cada alternativa se atribuyen principalmente a la disminución del volumen de material proveniente de cantera y su reemplazo parcial por RAP.

4.3.6.1. Como material de subbase.

DATOS ESPECÍFICOS							
ÍTEM	DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CANTIDAD		
320,3,1	SUBBASE GRANULAR CLASE C (Analizada para tipo de gradacion SBG-38 clase C, nivel de tránsito NT1, CBR >= 30%, para capas compactas entre 100mm y 200mm, compactas en capas de mínimo 100 mm.)			m3			
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010150	Carrotanque de agua (1000 Galones)		\$ 89.250,00	0,02649	\$ 2.364,36		
C0010610	Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18		\$ 303.450,00	0,02649	\$ 8.038,84		
C0010923	Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton		\$ 172.550,00	0,02649	\$ 4.571,10		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 698,60	5,00%	\$ 34,93		
				SUBTOTAL \$	\$ 15.009,23		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0014347	Material de sub- base clase C (NT1) gradación SBG-50	m3	1,3000	\$ 64.500,00	\$ 83.850,00		
B0063200	Agua	L	22,0000	\$ 71,85	\$ 1.580,65		
				SUBTOTAL \$	\$ 85.430,65		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0100035	transporte de materiales pétreos / térreos /	m3-km	1,3000	1,000	1,300	\$ 1.070,41	\$ 1.391,54
						SUBTOTAL \$	\$ 1.391,54
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030020	Obrero (2)	\$ 94.900,00	2,0378	\$ 193.384,15	276,8187	\$ 698,60	
						SUBTOTAL \$	\$ 698,60
						TOTAL COSTO DIRECTO \$	\$ 102.530,02

Tabla 37. APU de subbase granular clase C.

Fuente: INVIAS 2025; APU_7605_VALLE_DEL_CAUCA_SUR_2025_2.

DATOS ESPECÍFICOS							
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
320,3,1	SUBBASE GRANULAR CLASE C (60% SUBBASE +40%RAP) (Analizada para tipo de gradacion SBG-38 clase C, nivel de tránsito NT1, CBR >= 30%, para capas compactas entre 100mm y 200mm, compactas en capas de mínimo 100 mm.)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010150	Carrotanque de agua (1000 Galones)		\$ 89.250,00	0,02649	\$ 2.364,36		
C0010610	Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton		\$ 303.450,00	0,02649	\$ 8.038,84		
C0010923	Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton		\$ 172.550,00	0,02649	\$ 4.571,10		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 698,60	5,00%	\$ 34,93		
SUBTOTAL \$					\$ 15.009,23		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0014347	Material de sub- base clase C (NT1) gradación SBG-38	m3	0,7800	\$ 64.500,00	\$ 50.310,00		
	Material de RAP	m3	0,5200	\$ -	\$ -		
B0063200	Agua	L	22,0000	\$ 71,85	\$ 1.580,65		
SUBTOTAL \$					\$ 51.890,65		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0100035	transporte de materiales pétreos / térreos / granulares	m3-km	1,3000	1,000	1,300	\$ 1.070,41	\$ 1.391,54
SUBTOTAL \$							\$ 1.391,54
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030020	Obrero (2)	\$ 94.900,00	2,0378	\$ 193.384,15	276,8187	\$ 698,60	
SUBTOTAL \$							\$ 698,60
TOTAL COSTO DIRECTO \$							\$ 68.990,02

Tabla 38. APU de 60% subbase granular clase C + 40%RAP.

Fuente: Propia.

PORCENTAJE DE AHORRO:	32,71%
------------------------------	--------

En el análisis económico para subbase granular, al comparar el APU convencional (100% subbase de cantera) con el APU ajustado para la mezcla 60% subbase + 40% RAP, se obtuvo un ahorro del 32,71% en costos directos. Este resultado se explica porque únicamente se redujo la cantidad de subbase al 60% e incorporó el RAP como material con costo unitario cero, manteniendo sin cambios los demás insumos (equipos, mano de obra, transporte y rendimientos), por lo que la disminución del costo se atribuye principalmente al menor consumo de material de cantera.

DATOS ESPECÍFICOS							
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
320,3,1	SUBBASE GRANULAR CLASE C (50% SUBBASE +50%RAP) (Analizada para tipo de gradacion SBG-38 clase C, nivel de tránsito NTI, CBR >= 30%, para capas compactas entre 100mm y 200mm, compactas en capas de mínimo 100 mm.)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010150	Carro tanque de agua (1000 Galones)		\$ 89.250,00	0,02649	\$ 2.364,36		
C0010610	Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton		\$ 303.450,00	0,02649	\$ 8.038,84		
C0010923	Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton		\$ 172.550,00	0,02649	\$ 4.571,10		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 698,60	5,00%	\$ 34,93		
SUBTOTAL \$					\$ 15.009,23		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0014347	Material de sub- base clase C (NTI) gradación SBG-38	m3	0,6500	\$ 64.500,00	\$ 41.925,00		
	Material de RAP	m3	0,6500	\$ -			
B0063200	Agua	L	22,0000	\$ 71,85	\$ 1.580,65		
SUBTOTAL \$					\$ 43.505,65		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0100035	transporte de materiales pétreos / térreos / granulares	m3-km	1,3000	1,000	1,300	\$ 1.070,41	\$ 1.391,54
SUBTOTAL \$							\$ 1.391,54
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030020	Obrero (2)	\$ 94.900,00	2,0378	\$ 193.384,15	276,8187	\$ 698,60	
SUBTOTAL \$							\$ 698,60
TOTAL COSTO DIRECTO \$							\$ 60.605,02

Tabla 39. APU de 50% subbase granular clase C + 50%RAP.

Fuente: Propia.

PORCENTAJE DE AHORRO:	40,89%
------------------------------	--------

Para la subbase granular, al aplicar la dosificación 50% subbase + 50% RAP se obtuvo un ahorro del 40,89% en los costos directos respecto al APU convencional con 100% material de cantera. Como en el caso anterior, el análisis se basó en ajustar únicamente el componente de material, reduciendo la cantidad de subbase al 50% e incorporando el RAP como insumo adicional con costo unitario cero, de modo que la disminución del costo se asocia principalmente a la menor demanda de subbase de cantera.

DATOS ESPECÍFICOS							
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
320,3,1	SUBBASE GRANULAR CLASE C (40% SUBBASE +60%RAP) (Analizada para tipo de gradacion SBG-38 clase C, nivel de tránsito NT1, CBR >= 30%, para capas compactas entre 100mm y 200mm, compactas en capas de mínimo 100 mm.)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010150	Carro tanque de agua (1000 Galones)		\$ 89.250,00	0,02649	\$ 2.364,36		
C0010610	Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton		\$ 303.450,00	0,02649	\$ 8.038,84		
C0010923	Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton		\$ 172.550,00	0,02649	\$ 4.571,10		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 698,60	5,00%	\$ 34,93		
SUBTOTAL \$					\$ 15.009,23		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0014347	Material de sub- base clase C (NT1) gradación SBG-38	m3	0,5200	\$ 64.500,00	\$ 33.540,00		
	Material de RAP	m3	0,7800	\$ -	\$ -		
B0063200	Agua	L	22,0000	\$ 71,85	\$ 1.580,65		
SUBTOTAL \$					\$ 35.120,65		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0100035	transporte de materiales pétreos / térreos / granulares	m3-km	1,3000	1,000	1,300	\$ 1.070,41	\$ 1.391,54
SUBTOTAL \$							\$ 1.391,54
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030020	Obrero (2)	\$ 94.900,00	2,0378	\$ 193.384,15	276,8187	\$ 698,60	
SUBTOTAL \$							\$ 698,60
TOTAL COSTO DIRECTO \$							\$ 52.220,02

Tabla 40. APU de 40% subbase granular clase C + 60%RAP.

Fuente: Propia.

PORCENTAJE DE AHORRO:	49,07%
------------------------------	--------

Para la subbase granular, al utilizar la dosificación 40% subbase + 60% RAP se obtuvo un ahorro del 49,07% en los costos directos frente al APU convencional (100% subbase de cantera). Siguiendo el mismo criterio aplicado en los casos previos, el ajuste se concentró en el componente material, disminuyendo la participación de subbase al 40% e incorporando el RAP como insumo con precio unitario cero, por lo que la reducción del costo se explica principalmente por la menor cantidad de subbase proveniente de cantera.

SUBBASE CLASE C	
Material	PORCENTAJE DE AHORRO (%)
60% SBG + 40% RAP	32,71
50% SBG + 50% RAP	40,89
40% SBG + 60% RAP	49,07

Tabla 41. Cuadro comparativo de porcentajes de ahorro de subbase.

Fuente: Propia.

4.3.6.2. Como material de afirmado.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
311,1	AFIRMADO (Analizado para compactación de 120mm a 300 mm compactado en capas mínimo de 120mm, CBR>= 15%. Incluye suministro, transporte y compactación.)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010150	Carrotanque de agua (1000 Galones)		\$ 89.250,00	0,02355	\$ 2.101,66		
C0010610	Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton		\$ 303.450,00	0,02355	\$ 7.145,63		
C0010923	Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton		\$ 172.550,00	0,02355	\$ 4.063,20		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 1.120,94	5,00%	\$ 56,05		
SUBTOTAL \$					\$ 13.366,54		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0063200	Agua	L	22,0000	\$ 71,85	\$ 1.580,65		
B0014270	Material de afirmado CBR ≥ 15%	m3	1,2500	\$ 41.650,00	\$ 52.062,50		
SUBTOTAL \$					\$ 53.643,15		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
SUBTOTAL \$							\$ -
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0040010	Oficial	\$ 80.665,00	1,9302	\$ 155.700,00	311,4210	\$ 499,97	
A0030020	Obrero (2)	\$ 94.900,00	2,0378	\$ 193.384,15	311,4210	\$ 620,97	
SUBTOTAL \$							\$ 1.120,94
TOTAL COSTO DIRECTO \$							\$ 68.130,63

Tabla 42. APU de Afirmado.

Fuente: INVIAS 2025; APU_7605_VALLE_DEL_CAUCA__SUR_2025_2.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
311,1	AFIRMADO (60%SBG-38 + 40% RAP) (Analizado para compactación de 120mm a 300 mm compactado en capas mínimo de 120mm, CBR>= 15%. Incluye suministro, transporte y compactación.)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010150	Carrotanque de agua (1000 Galones)		\$ 89.250,00	0,02355	\$ 2.101,66		
C0010610	Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton		\$ 303.450,00	0,02355	\$ 7.145,63		
C0010923	Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton		\$ 172.550,00	0,02355	\$ 4.063,20		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 1.120,94	5,00%	\$ 56,05		
SUBTOTAL \$					\$ 13.366,54		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0063200	Agua	L	22,0000	\$ 71,85	\$ 1.580,65		
B0014347	Material de sub- base clase C (NTI) gradación SBG-50	m3	0,7500	\$ 64.500,00	\$ 48.375,00		
	Material de RAP	m3	0,5000	\$ -	\$ -		
SUBTOTAL \$					\$ 49.955,65		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
SUBTOTAL \$							\$ -
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0040010	Oficial	\$ 80.665,00	1,9302	\$ 155.700,00	311,4210	\$ 499,97	
A0030020	Obrero (2)	\$ 94.900,00	2,0378	\$ 193.384,15	311,4210	\$ 620,97	
SUBTOTAL \$							\$ 1.120,94
TOTAL COSTO DIRECTO \$							\$ 64.443,13

Tabla 43. APU de Afirmado (60% subbase granular clase C + 40%RAP).

Fuente: Propia.

PORCENTAJE DE AHORRO:	5%
------------------------------	----

Para el caso del material tipo afirmado, la evaluación económica indica que al incorporar la dosificación 60% subbase + 40% RAP se obtiene un ahorro del 5% en los costos directos frente a la alternativa convencional. Siguiendo la misma metodología aplicada previamente, la variación se explica por el ajuste realizado únicamente en el componente material, disminuyendo la participación del material de cantera e incluyendo el RAP como insumo adicional con costo unitario cero, por lo que el ahorro observado corresponde principalmente a la reducción en la cantidad de material granular comprado.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
311,1	AFIRMADO (50%SBG-38 + 50% RAP) (Analizado para compactación de 120mm a 300 mm compactado en capas mínimo de 120mm, CBR>= 15%. Incluye suministro, transporte y compactación.)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010150	Carro tanque de agua (1000 Galones)		\$ 89.250,00	0,02355	\$ 2.101,66		
C0010610	Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton		\$ 303.450,00	0,02355	\$ 7.145,63		
C0010923	Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton		\$ 172.550,00	0,02355	\$ 4.063,20		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 1.120,94	5,00%	\$ 56,05		
SUBTOTAL \$					\$ 13.366,54		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0063200	Agua	L	22.0000	\$ 71,85	\$ 1.580,65		
B0014347	Material de sub- base clase C (NTI) gradación SBG-50	m3	0,6250	\$ 64.500,00	\$ 40.312,50		
	Material de RAP	m3	0,6250	\$ -	\$ -		
SUBTOTAL \$					\$ 41.893,15		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
SUBTOTAL \$							\$ -
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0040010	Oficial	\$ 80.665,00	1,9302	\$ 155.700,00	311,4210	\$ 499,97	
A0030020	Obrero (2)	\$ 94.900,00	2,0378	\$ 193.384,15	311,4210	\$ 620,97	
SUBTOTAL \$						\$ 1.120,94	
TOTAL COSTO DIRECTO \$						\$ 56.380,63	

Tabla 44. APU de Afirmado (50% subbase granular clase C + 50%RAP).

Fuente: Propia.

PORCENTAJE DE AHORRO:	17%
------------------------------	-----

En el caso del afirmado, la sustitución del material convencional por la mezcla 50% subbase + 50% RAP generó un ahorro del 17% en el costo directo. La reducción se origina en que parte del volumen que normalmente se cubriría con material de cantera se reemplazó por RAP (considerado con precio unitario cero), manteniéndose el resto de las condiciones del APU, por lo que el efecto económico se refleja principalmente en el componente de materiales.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
311,1	AFIRMADO (40%SBG-38 + 60% RAP) (Analizado para compactación de 120mm a 300 mm compactado en capas mínimo de 120mm, CBR>= 15%. Incluye suministro, transporte y compactación.)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010150	Carro tanque de agua (1000 Galones)		\$ 89.250,00	0,02355	\$ 2.101,66		
C0010610	Motoniveladora potencia 215 HP, ancho de cuchilla 4,27 m, peso 18 ton		\$ 303.450,00	0,02355	\$ 7.145,63		
C0010923	Vibrocompactador, potencia 153 HP, peso 10 ton		\$ 172.550,00	0,02355	\$ 4.063,20		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 1.120,94	5,00%	\$ 56,05		
SUBTOTAL \$					\$ 13.366,54		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0063200	Agua	L	22,0000	\$ 71,85	\$ 1.580,65		
B0014347	Material de sub- base clase C (NT1) gradación SBG-50	m3	0,5000	\$ 64.500,00	\$ 32.250,00		
	Material de RAP	m3	0,7500	\$ -	\$ -		
SUBTOTAL \$					\$ 33.830,65		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
SUBTOTAL \$							\$ -
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0040010	Oficial	\$ 80.665,00	1,9302	\$ 155.700,00	311,4210	\$ 499,97	
A0030020	Obrero (2)	\$ 94.900,00	2,0378	\$ 193.384,15	311,4210	\$ 620,97	
SUBTOTAL \$						\$ 1.120,94	
TOTAL COSTO DIRECTO \$						\$ 48.318,13	

Tabla 45. APU de Afirmado (40% subbase granular clase C + 60%RAP).

Fuente: Propia.

PORCENTAJE DE AHORRO:	29%
------------------------------	-----

Cuando el afirmado se formuló reemplazando el material convencional por la mezcla 40% subbase + 60% RAP, el costo directo disminuyó en 29% respecto a la alternativa tradicional. Este mayor ahorro se explica por el incremento en la fracción de RAP incorporada (asumida con costo unitario cero), lo que reduce de forma más marcada la cantidad de material granular comprado de cantera y concentra el efecto económico principalmente en el rubro de materiales.

AFIRMADO	
Material	PORCENTAJE DE AHORRO (%)
60% SBG + 40% RAP	5,00
50% SBG + 50% RAP	17,00
40% SBG + 60% RAP	29,00

Tabla 46. Cuadro comparativo de porcentaje de ahorro de afirmado.

Fuente: Propia.

4.3.6.3. Como material de relleno.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
610,4	RELLENOS PARA ESTRUCTURAS CON MATERIAL GRANULAR TIPO SBG-38 (Incluye el transporte y el suministro in situ del material de relleno, así como su extensión, humedecimiento y compactación a través de medios manuales. No se incluye la preparación de la superficie base del relleno)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010200	Compactador manual (saltarín) peso de operación (kg.) 52, fuerza de impacto por golpe (KN)		\$ 9.817,50	0,40000	\$ 3.927,00		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 29.589,18	5,00%	\$ 1.479,46		
SUBTOTAL \$					\$ 5.406,46		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0014346	Material de sub- base clase C (NT1) gradación SBG-38	m3	1,3000	\$ 64.500,00	\$ 83.850,00		
B0063200	Agua	L	30,0000	\$ 71,85	\$ 2.155,43		
SUBTOTAL \$					\$ 86.005,43		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0100035	transporte de materiales pétreos / térreos / granulares	m3-km	1,3000	1,000	1,300	\$ 1.070,41	\$ 1.391,54
SUBTOTAL \$							\$ 1.391,54
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030040	Obrero (4)	\$ 189.800,00	2,0378	\$ 386.768,31	18,3333	\$ 21.096,45	
A0040010	Oficial	\$ 80.665,00	1,9302	\$ 155.700,00	18,3333	\$ 8.492,73	
SUBTOTAL \$							\$ 29.589,18
TOTAL COSTO DIRECTO \$							\$ 122.392,61

Tabla 47. APU de Rellenos para estructuras.

Fuente: INVIAS 2025; APU_7605_VALLE_DEL_CAUCA__SUR_2025_2.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
610,4	RELLENOS PARA ESTRUCTURAS CON MATERIAL GRANULAR TIPO SBG-38 (60%SBG-38+40%RAP) (Incluye el transporte y el suministro in situ del material de relleno, así como su extensión, humedecimiento y compactación a través de medios manuales. No se incluye la preparación de la superficie base del relleno)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010200	Compactador manual (saltarín) peso de operación (kg.) 52, fuerza de impacto por golpe (KN)		\$ 9.817,50	0,40000	\$ 3.927,00		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 29.589,18	5,00%	\$ 1.479,46		
SUBTOTAL \$					\$ 5.406,46		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0014346	Material de sub- base clase C (NTI) gradación SBG-38	m3	0,7800	\$ 64.500,00	\$ 50.310,00		
	Material de RAP	m3	0,5200	\$ -	\$ -		
B0063200	Agua	L	30,0000	\$ 71,85	\$ 2.155,43		
SUBTOTAL \$					\$ 52.465,43		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0100035	transporte de materiales pétreos / térreos / granulares	m3-km	1,3000	1,000	1,300	\$ 1.070,41	\$ 1.391,54
SUBTOTAL \$							\$ 1.391,54
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030040	Obrero (4)	\$ 189.800,00	2,0378	\$ 386.768,31	18,3333	\$ 21.096,45	
A0040010	Oficial	\$ 80.665,00	1,9302	\$ 155.700,00	18,3333	\$ 8.492,73	
SUBTOTAL \$						\$ 29.589,18	
TOTAL COSTO DIRECTO \$						\$ 88.852,61	

Tabla 48. APU de Rellenos para estructuras (60% subbase granular clase C + 40%RAP).

Fuente: Propia.

PORCENTAJE DE AHORRO:	27%
------------------------------	-----

Para el escenario de material de relleno, al adoptar la mezcla 60% subbase + 40% RAP se obtuvo un ahorro del 27% en el costo directo frente al APU convencional del relleno. La reducción se asocia a que una parte del material granular comprado se sustituyó por RAP (considerado con costo unitario cero), lo que disminuye el componente de materiales y, en consecuencia, el costo total directo de la actividad.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
610,4	RELLENOS PARA ESTRUCTURAS CON MATERIAL GRANULAR TIPO SBG-38 (50%SBG-38+50%RAP) (incluye el transporte y el suministro in situ del material de relleno, así como su extensión, humedecimiento y compactación a través de medios manuales. No se incluye la preparación de la superficie base del relleno)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010200	Compactador manual (saltarín) peso de operación (kg.) 52, fuerza de impacto por golpe (KN)		\$ 9.817,50	0,40000	\$ 3.927,00		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 29.589,18	5,00%	\$ 1.479,46		
SUBTOTAL \$					\$ 5.406,46		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0014346	Material de sub- base clase C (NTI) gradación SBG-38	m3	0,6500	\$ 64.500,00	\$ 41.925,00		
	Material de RAP	m3	0,6500	\$ -	\$ -		
B0063200	Agua	L	30,0000	\$ 71,85	\$ 2.155,43		
SUBTOTAL \$					\$ 44.080,43		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0100035	transporte de materiales pétreos / térreos / granulares	m3-km	1,3000	1,000	1,300	\$ 1.070,41	\$ 1.391,54
SUBTOTAL \$						\$ 1.391,54	
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030040	Obrero (4)	\$ 189.800,00	2,0378	\$ 386.768,31	18,3333	\$ 21.096,45	
A0040010	Oficial	\$ 80.665,00	1,9302	\$ 155.700,00	18,3333	\$ 8.492,73	
SUBTOTAL \$					\$ 29.589,18		
TOTAL COSTO DIRECTO \$					\$ 80.467,61		

Tabla 49. APU de Rellenos para estructuras (50% subbase granular clase C + 50%RAP).

Fuente: Propia.

PORCENTAJE DE AHORRO:	34%
------------------------------	-----

Al sustituir el material convencional por la mezcla 50% subbase + 50% RAP, el análisis arrojó un ahorro del 34% en el costo directo. Este incremento del ahorro frente al 60/40 es coherente con la mayor participación de RAP (considerado sin costo), lo que reduce más la cantidad de material de cantera requerida y disminuye el valor del rubro de materiales dentro del APU.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	GRUPO DE AJUSTE	UNIDAD	CANTIDAD			
610,4	RELLENOS PARA ESTRUCTURAS CON MATERIAL GRANULAR TIPO SBG-38 (40%SBG-38+60%RAP) (Incluye el transporte y el suministro in situ del material de relleno, así como su extensión, humedecimiento y compactación a través de medios manuales. No se incluye la preparación de la superficie base del relleno)		m3				
I. EQUIPO							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	TIPO	TARIFA/HORA	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO		
C0010200	Compactador manual (saltarín) peso de operación (kg.) 52, fuerza de impacto por golpe (kN)		\$ 9.817,50	0,40000	\$ 3.927,00		
	HERRAMIENTA MENOR (% MANO DE OBRA)	%	\$ 29.589,18	5,00%	\$ 1.479,46		
SUBTOTAL \$					\$ 5.406,46		
II. MATERIALES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	Vr. UNITARIO		
B0014346	Material de sub- base clase C (NT1) gradación SBG-38	m3	0,5200	\$ 64.500,00	\$ 33.540,00		
	Material de RAP	m3	0,7800	\$ -	\$ -		
B0063200	Agua	L	30,0000	\$ 71,85	\$ 2.155,43		
SUBTOTAL \$					\$ 35.695,43		
III. TRANSPORTES							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (1)	DISTANCIA (2)	(1) * (2)	TARIFA	Vr. UNITARIO
T0100035	transporte de materiales pétreos / térreos / granulares	m3-km	1,3000	1,000	1,300	\$ 1.070,41	\$ 1.391,54
SUBTOTAL \$							\$ 1.391,54
IV. MANO DE OBRA							
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	JORNAL	PRESTACIONES (%)	JR. TOTAL	RENDIMIENTO	Vr. UNITARIO	
A0030040	Obrero (4)	\$ 189.800,00	2,0378	\$ 386.768,31	18,3333	\$ 21.096,45	
A0040010	Oficial	\$ 80.665,00	1,9302	\$ 155.700,00	18,3333	\$ 8.492,73	
SUBTOTAL \$						\$ 29.589,18	
TOTAL COSTO DIRECTO \$						\$ 72.082,61	

Tabla 50. APU de Rellenos para estructuras (40% subbase granular clase C + 60%RAP).

Fuente: Propia.

PORCENTAJE DE AHORRO:	41%
------------------------------	-----

Finalmente, para el material de relleno, la dosificación 40% subbase granular + 60% RAP alcanzó el mayor beneficio económico, con un ahorro del 41% en el costo directo frente al APU convencional. Este resultado refleja que, al aumentar la proporción de RAP (considerado sin costo), se reduce en mayor medida la cantidad de subbase proveniente de cantera requerida para completar el volumen del relleno, disminuyendo principalmente el valor asociado al suministro de materiales.

En conjunto, el análisis confirma que la incorporación de RAP en mezclas con material granular genera un efecto económico favorable en los tres escenarios evaluados (subbase, afirmado y relleno), debido a que sustituye parcialmente el volumen de material de cantera por un insumo asumido con costo unitario cero, reduciendo de forma directa el rubro de materiales. En subbase, los ahorros aumentaron de manera progresiva al incrementar el contenido de RAP, mostrando que el costo directo es altamente sensible a la cantidad de material virgen requerido. Para el afirmado, la misma tendencia se mantuvo, aunque con magnitudes menores. En el caso del relleno, los resultados también fueron consistentes y crecientes con el porcentaje de RAP, registrándose ahorros de 27%, 34% y 41%, lo que posiciona estas mezclas como una alternativa económicamente atractiva para usos no estructurales o de menor exigencia. En conclusión las mezclas presentan un potencial claro de optimización presupuestal, siempre que se garantice la logística de suministro, el control de humedad/compactación y que, en aplicaciones reales, se incorporen los costos adicionales que puedan surgir por acopio, procesamiento y aseguramiento de calidad del RAP.

RELLENO ESTRUCTURAL	
Material	PORCENTAJE DE AHORRO (%)
60% SBG + 40% RAP	27,00
50% SBG + 50% RAP	34,00
40% SBG + 60% RAP	41,00

Tabla 51. Cuadro comparativo de porcentaje de ahorro de relleno estructural.
Fuente: Propia.

4.3.7. Comparación del impacto ambiental.

Extraer subbase desde una cantera implica impactos ambientales asociados a la extracción y beneficio del agregado (remoción de suelo, cambios en el paisaje, pérdida de hábitat), además de polvo, ruido, efectos de voladuras, erosión y sedimentación durante la operación, impactos que son comúnmente reconocidos en la minería de agregados (U.S. Geological Survey [USGS], 2002). A esto se suma el consumo de diésel y energía en maquinaria y procesos

(perforación/voladura, cargue, trituración y clasificación), los cuales pueden contribuir de forma relevante en categorías de impacto ambiental según estudios de análisis de ciclo de vida de agregados vírgenes (de Bortoli, 2023).

En cambio, al usar RAP dentro de mezclas granulares, parte del volumen que normalmente se obtendría de cantera se sustituye por un material recuperado de rehabilitación de pavimentos, lo que reduce la demanda de agregado virgen y, por tanto, la presión sobre la explotación de recursos naturales. La FHWA resalta que el RAP es una alternativa útil porque disminuye el uso de agregados vírgenes, conserva recursos y puede reducir consumos energéticos y costos asociados a la obtención de materiales vírgenes (Federal Highway Administration [FHWA], 2011). Además, la FHWA indica que el RAP puede emplearse como base/subbase granular y también en rellenos e “engineered fill”, es decir, no solo como mezcla asfáltica sino como material granular reutilizable (FHWA, 1997).

Llevando esto a la explotación de 1 m³ (en términos prácticos y suponiendo que la sustitución volumétrica es aproximadamente proporcional), las mezclas 60% SBG–40% RAP, 50%–50% y 40% SBG–60% RAP evitarían explotar alrededor de 0,40 m³, 0,50 m³ y 0,60 m³ de cantera, respectivamente. Eso implica que los impactos directamente ligados a la extracción y procesamiento del agregado virgen (polvo/ruido local, alteración del terreno y parte del consumo de combustibles y energía en cantera) se reducirían en ese mismo orden de magnitud, mientras que, simultáneamente, se aprovecha un material que de otro modo podría ir a acopios o disposición. En esa línea, estudios de práctica institucional reportan que no se identifican preocupaciones ambientales mayores cuando el RAP se usa sin agentes químicos de estabilización (Hoppe et al., 2015).

Dicho esto, el beneficio ambiental real no depende solo del porcentaje de RAP: también influye la distancia de transporte y el procesamiento requerido (cribado/trituración). En LCAs de agregados se ha mostrado que el transporte puede incrementar significativamente los impactos totales, incluso llegando a duplicar el impacto “a puerta de cantera” cuando las distancias son altas (de Bortoli, 2025). Al incorporar RAP se reduce la extracción de agregado virgen y, por ende, los impactos asociados a la explotación de cantera, siempre que el RAP se obtenga y procese con logística razonable (distancias cortas y control de procesamiento).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

El programa experimental desarrollado permitió caracterizar el comportamiento de mezclas RAP–material granular en proporciones 60/40, 50/50 y 40/60, evidenciando que el contenido de RAP influye principalmente en la compactación (reducción de densidad seca máxima y ajustes en humedad óptima) y, sobre todo, en la sensibilidad del soporte al nivel de compactación aplicado, dado que los CBR disminuyen de forma marcada cuando se trabaja con energías bajas; por tanto, el desempeño esperado en obra depende críticamente del control de humedad y del cumplimiento estricto del grado de compactación.

A partir de la verificación frente a criterios normativos, las mezclas mantienen el cumplimiento de la franja granulométrica asociada a SBG-38 y alcanzan un CBR cercano a 38%, superior al umbral mínimo exigible para subbase Clase C, lo que respalda su factibilidad técnica como subbase granular dentro de los parámetros evaluados; adicionalmente, el bajo contenido de finos observado hace coherente que el plan de ensayos se haya concentrado en pruebas directamente vinculadas al desempeño (granulometría, Proctor y CBR), sin recurrir a Límites de Atterberg, cuyo aporte en materiales predominantemente granulares suele ser limitado.

En el análisis de usos alternativos, se concluye que el uso como afirmado queda condicionado por el cumplimiento simultáneo de la franja A-38, de modo que, cuando la curva granulométrica de las mezclas cae por debajo del límite inferior, el material no debería aceptarse como afirmado en su estado actual pese a contar con CBR relativamente alto; en contraste, para rellenos estructurales con referencia SBG-38, el material presenta un escenario más favorable en la medida en que la gradación y el soporte estimado resultan compatibles con aplicaciones donde la exigencia funcional está dominada por estabilidad, compactación y control de calidad del relleno.

En el componente económico, el análisis de costos directos evidenció que la incorporación de RAP permite reducir el costo del ítem principalmente por la disminución del volumen de material de cantera, presentándose ahorros crecientes al aumentar el porcentaje de reemplazo (con el escenario base de RAP a costo cero); no obstante, la viabilidad real debe evaluarse considerando de manera explícita los costos de transporte, acopio y posible procesamiento del RAP, ya que estos pueden disminuir significativamente el beneficio observado si las distancias fuente–obra son elevadas o si se requieren reprocesos adicionales.

Desde el enfoque ambiental, el uso de RAP aporta una ventaja al disminuir la demanda de agregados vírgenes y, por tanto, los impactos asociados a la explotación y beneficio en cantera, además de promover la valorización de un material recuperado; sin embargo, el balance ambiental final depende en gran medida de la logística, especialmente del transporte y del nivel de procesamiento requerido, por lo que los beneficios aumentan cuando el RAP proviene de fuentes cercanas y se gestiona con un manejo adecuado de acopios y control de humedad.

5.2. Recomendaciones.

Para la implementación en campo, se deberá, conforme a las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVÍAS (EGCC vigente) y al plan de aseguramiento y control de calidad del proyecto, implementar y verificar un control de compactación y de humedad de colocación acorde con los criterios de aceptación establecidos, considerando la fuerte dependencia observada entre densidad seca y CBR; en particular, debe evitarse trabajar en condición sobrehumedecida, dado que en las mezclas se evidenció afloramiento de agua a humedades altas durante la compactación, lo cual reduce la eficiencia de densificación y puede traducirse en pérdidas de soporte y heterogeneidades en la capa ejecutada.

Si se pretende habilitar el uso como afirmado, se recomienda tratar la corrección granulométrica como condición previa de aceptación, mediante combinación con material que aporte fracciones intermedias/fina e implementación de procesamiento del RAP (cribado y/o trituración) hasta ingresar a la franja A-38, verificando además las relaciones complementarias exigidas por la especificación; si no se dispone de medios para garantizar esa corrección y el control de producción, resulta más prudente orientar las mezclas hacia subbase SBG-38 o rellenos estructurales, donde el cumplimiento de la banda granulométrica verificada y el soporte estimado presentan mejor coherencia con el desempeño esperado.

En la evaluación económica y ambiental se recomienda complementar el análisis de ahorros directos incorporando escenarios realistas de logística: costo y distancia de transporte del RAP, tiempos de acopio, posibles pérdidas por segregación/contaminación, y costos de procesamiento y aseguramiento de calidad, ya que estos factores pueden modificar sustancialmente la conveniencia del aprovechamiento; en paralelo, para fortalecer la discusión ambiental, es recomendable consolidar indicadores que relacionen el porcentaje de sustitución volumétrica con reducción de extracción en cantera y con impactos de transporte, de manera que la conclusión

de sostenibilidad quede explícitamente amarrada a la condición de distancias “razonables” entre la fuente de RAP y el sitio de obra.

6. REGISTRO FOTOGRÁFICO.

6.1. EQUIPOS UTILIZADOS:



7. RECURSOS.

7.1. Bibliografía.

- [1]. American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures*. AASHTO.
- [2]. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). *Standard specification for reclaimed asphalt pavement (RAP) for use in asphalt mixtures (AASHTO M 319-14)*. AASHTO.
- [3]. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Standard method of test for moisture-density relations of soils using a 4.54-kg (10-lb) rammer and a 457-mm (18-in.) drop (AASHTO T 180-20)*. AASHTO.
- [4]. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Standard method of test for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils (AASHTO T 193-20)*. AASHTO.
- [5]. Arshad, M., & Ahmed, M. F. (2017). *Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements*. *Construction and Building Materials*, 151, 83–97. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.028
- [6]. ASTM International. (2021). *Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils (ASTM D1883-21)*. ASTM International.
- [7]. ASTM International. (2020). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (ASTM D1557-20)*. ASTM International.
- [8]. ASTM International. (2022). *Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine (ASTM C131/C131M-22)*. ASTM International.
- [9]. ASTM International. (2022). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates (ASTM C136/C136M-22)*. ASTM International.
- [10]. ASTM International. (2021). *Standard test method for materials finer than 75- μ m (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing (ASTM C117-21)*. ASTM International.
- [11]. ASTM International. (2023). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils (ASTM D4318-23)*. ASTM International.
- [12]. ASTM International. (2019). *Standard test method for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis (ASTM D6913/D6913M-17e1)*. ASTM International.
- [13]. Buitrago García, V. K. (2017). *Revisión de literatura sobre el uso de asfalto flexible reciclado (RAP) [Trabajo de grado]*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- [14]. Camacho-Salazar, P. C. (2016). *Evaluación del reciclado de pavimentos asfálticos (RAP) para uso en pavimentos expuestos [Trabajo final de graduación]*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

- [15]. Chesner, W. H., Collins, R. J., & MacKay, M. H. (1998). *User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction (FHWA-RD-97-148)*. Federal Highway Administration.
- [16]. Copeland, A. (2011). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice (FHWA-HRT-11-021)*. Federal Highway Administration.
- [17]. Cueto Ramos, O. M., & Rozo Álvarez, C. A. (2022). *Análisis aplicativo del pavimento asfáltico reciclado (RAP) en Colombia [Trabajo de grado]*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- [18]. Dong, Q., & Huang, B. (2014). Laboratory evaluation on resilient modulus and rate dependencies of RAP used as unbound base material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 379–383.
- [19]. Edil, T. B., Tinjum, J. M., & Benson, C. H. (2012). *Recycled unbound materials (MN/RC 2012-24)*. Minnesota Department of Transportation.
- [20]. Guthrie, W. S., Cooley, D. A., & Eggett, D. L. (2007). Effects of reclaimed asphalt pavement on mechanical properties of base materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2005(1), 44–52. doi:10.3141/2005-06
- [21]. Guthrie, W. S., Brown, A. V., & Eggett, D. L. (2007). Cement stabilization of aggregate base material blended with reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2026(1), 47–53. doi:10.3141/2026-06
- [22]. Hoppe, E. J., Lane, D. S., Fitch, G. M., & Shetty, S. (2015). *Feasibility of reclaimed asphalt pavement (RAP) use as road base and subbase material (VTRC 15-R6)*. Virginia Transportation Research Council.
- [23]. Instituto Nacional de Vías. (2013). *Normas de ensayo para materiales de carreteras*. INVÍAS.
- [24]. Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-142-13: *Compactación de suelos en el laboratorio con energía modificada (Proctor modificado)*. INVÍAS.
- [25]. Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-148-13: *Determinación de la relación soporte California (CBR) en suelos y materiales granulares*. INVÍAS.
- [26]. Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-213-13: *Análisis granulométrico de agregados por tamizado*. INVÍAS.
- [27]. Instituto Nacional de Vías. (2013). INV E-218-13: *Desgaste de los agregados con la máquina de Los Ángeles*. INVÍAS.
- [28]. Instituto Nacional de Vías. (2022). *Especificaciones generales de construcción de carreteras (EGCC)*. INVÍAS.
- [29]. Méndez Revollo, H. (2015). *Aprovechamiento del pavimento asfáltico recuperado (RAP) en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente [Trabajo de grado]*. Universidad Militar Nueva Granada.

- [30]. Miranda-Argüello, J., & Aguiar-Moya, J. P. (2019). Mezclas asfálticas con RAP: Pavimentos asfálticos reciclados. *Boletín Técnico: PITRA-LanammeUCR*, 10(1). Universidad de Costa Rica.
- [31]. Peña Urrea, C. C., & Cáceres Cabrera, J. A. (2021). Caracterización de una muestra de pavimento asfáltico reciclado (RAP) para su utilización en capas de base y subbase granular del pavimento [Trabajo de grado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [32]. Plati, C., & Cliatt, B. (2019). A sustainability perspective for unbound reclaimed asphalt pavement (RAP) as a pavement base material. *Sustainability*, 11(1), 78. doi:10.3390/su11010078
- [33]. Puppala, A. J., Hoyos, L. R., & Potturi, A. K. (2011). Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 990–998. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000268
- [34]. Putri, E. E., Saleh, S. M., & Anggraini, R. (2018). Review of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials for roadway construction. *MATEC Web of Conferences*, 197, 08007. doi:10.1051/mateconf/201819708007
- [35]. Saeed, A. (2008). Performance-related tests of recycled aggregates for use in unbound pavement layers (NCHRP Report 598). Transportation Research Board.
- [36]. Seferoğlu, M. T., & Örnek, M. (2018). Investigation of the effect of recycled asphalt pavement material on permeability and bearing capacity in the base layer. *Advances in Civil Engineering*, 2018, Article 2860213. doi:10.1155/2018/2860213
- [37]. Seferoğlu, M. T., Örnek, M., & Zeybek, S. (2019). Evaluation of reclaimed asphalt pavement material for base and subbase layers. *Teknik Dergi*. doi:10.18400/tekderg.416812
- [38]. Solarte Vanegas, G. D., Torres Roza, A. D., Arteaga Ardila, D., & Mesa Bernal, J. (2024). Revisión de literatura sobre el uso de asfalto flexible reciclado (RAP). *Lámpsakos*, 33, 65–76. doi:10.21501/21454086.5194
- [39]. Tanyu, B. F., Ullah, S., & Akmaz, O. (2021). Optimizing reclaimed asphalt pavement (RAP) content in unbound base aggregate (VTRC 22-R9). Virginia Transportation Research Council.
- [40]. Ullah, S., Tanyu, B. F., & Dawson, A. (2022). Reclaimed asphalt pavement (RAP) as an unbound base course material: A mechanistic design approach based on multi-stage repeated load triaxial tests. *Transportation Geotechnics*, 33, 100729. doi:10.1016/j.trgeo.2022.100729
- [41]. Valencia Céspedes, S. A. (2024). Evaluación de la respuesta mecánica de un material RAP mezclado con material granular y estabilizado con cemento para su uso en capas de pavimento [Tesis de pregrado]. Universidad de los Andes.
- [42]. McDaniel, R. S., & Anderson, R. M. (2001). Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method (NCHRP Report 452). Transportation Research Board, National Research Council.

- [43]. Yuan, D., Nazarian, S., Hoyos, L. R., & Puppala, A. J. (2011). *Evaluation and mix design of cement-treated base materials with high content of reclaimed asphalt pavement*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2212(1), 110–119. doi:10.3141/2212-12
- [44]. Federal Highway Administration. (1998). *User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction (FHWA-RD-97-148)*. U.S. Department of Transportation.
- [45]. Attia, M., & Abdelrahman, M. (2010). *Variability in resilient modulus of reclaimed asphalt pavement as base layer and its impact on flexible pavement performance*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. doi:10.3141/2167-03