

**RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) USADOS COMO  
CAPAS DE BASE Y SUBBASE EN PAVIMENTOS - DESEMPEÑO  
ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS ECONÓMICO**



**ESTEFANÍA BERMÚDEZ CASTAÑEDA**  
**CÓDIGO: 100418021176**  
**CC.: 1002861164**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**  
**POPAYÁN**  
**2024**

**RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) USADOS COMO  
CAPAS DE BASE Y SUBBASE EN PAVIMENTOS - DESEMPEÑO  
ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS ECONÓMICO**



Realizado por:  
ESTEFANÍA BERMÚDEZ CASTAÑEDA  
CÓDIGO: 100418021176  
CC.: 1002861164

Trabajo de grado, modalidad investigación para obtener el título en Ingeniería civil

Director:  
PhD. FERNEY QUIÑONES SINISTERRA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA  
POPAYÁN  
2024

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

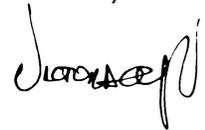
---

---

---



Director



Jurado



Jurado

Septiembre de 2024. Popayán, Cauca, Colombia.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

BERMÚDEZ, E (2024). Residuos de Construcción y Demolición (RCD) usados como capas de base y subbase en pavimentos - Desempeño estructural y Análisis Económico. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca, Colombia, 228 p.

## ASIGNACIÓN DE DERECHOS

NOMBRE DEL AUTOR: Estefanía Bermúdez Castañeda

TÍTULO DE LA TESIS DE PREGRADO: Residuos de Construcción y Demolición (RCD) usados como capas de base y subbase en pavimentos - Desempeño estructural y Análisis Económico.

TÍTULO/AÑO: Ingeniera Civil/2024

Se otorga permiso a la Universidad del Cauca para reproducir copias de este trabajo de grado de pregrado y para prestar o vender tales copias solamente para propósitos académicos y científicos, la autora se reserva otros derechos de publicación y ninguna copia de este trabajo puede ser reproducida sin la autorización por escrito de la misma.



---

Estefanía Bermúdez Castañeda

CC.: 1002861164

e-mail: ebermudez@unicauca.edu.co

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de investigación a mis padres, Delio Bermúdez y Elizabeth Castañeda, quienes son pilares fundamentales en mi vida para cumplir cada una de mis metas. Su apoyo constante y amor incondicional siempre me alentaron para poder llegar hasta aquí.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme la vida y la sabiduría con la que he podido culminar esta etapa llena de tantas experiencias enriquecedoras.

A mi papá, que con su cariño y cuidado me ha enseñado las cosas valiosas de la vida y me inculcó el amor por la ingeniería.

A mi mamá, que sin importar qué, cada segundo de su vida me ha apoyado y ha sido mi más grande instructora.

A mi abuelo Arbey, ejemplo de determinación y perseverancia, gracias por su ternura, y por inculcarme valores que me han permitido ser quien soy.

A mi abuela Claribel, gracias por su amor, consejos y por ser un ejemplo inquebrantable en mi vida.

A mi abuela Enriqueta, cuyo amor llevaré siempre en mi corazón, donde sea que esté.

A mi abuelo Edgar, su carisma será el legado que más atesoraré por siempre.

A mi familia, quienes han contribuido enormemente en mi formación personal y profesional, su amor es el motor que impulsa mis días.

A mi director de trabajo de grado, el ingeniero Ferney Quiñones, mi agradecimiento por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo, haber estado dispuesto siempre a compartir su valioso conocimiento y dejar enseñanzas que quedarán plasmadas para mi vida profesional del porvenir.

A los profesores que me acompañaron durante mi paso por la universidad, y cuyas enseñanzas permiten la formación de personas destacadas por su excelencia profesional, este trabajo es resultado directo de sus valiosas lecciones.

Al equipo técnico del laboratorio de pavimentos de la Universidad del Cauca, por su constante apoyo en el desarrollo de la investigación.

A mis compañeros universitarios, que, sin su presencia, el cumplimiento de este sueño no habría sido tan llevadero, al igual que a mis amigos y a las personas que de una u otra manera contribuyeron al alcance de esta meta.

# CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	24
1.1 PROBLEMA.....	24
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	26
1.3 ORGANIZACIÓN.....	28
1.4 HIPÓTESIS .....	30
1.5 OBJETIVOS .....	31
1.5.1 General .....	31
1.5.2 Específicos.....	31
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	32
2.1 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) .....	32
2.2 GENERACIÓN Y VOLUMEN DE LOS RCD .....	34
2.3 IMPACTOS AMBIENTALES .....	38
2.4 AGREGADO RECICLADO (AR).....	40
2.5 GESTIÓN DE LOS RCD .....	41
2.6 PROPIEDADES DE LOS AR .....	44
2.7 UTILIZACIÓN Y ESTUDIOS ANTERIORES DE LOS AR.....	48
2.8 USOS TÉCNICOS O GENERALES DE LOS AR.....	51
2.9 IMPACTOS FINANCIEROS DE LA UTILIZACIÓN DE AR .....	53
2.10 SOFTWARE PARA EVALUAR LA RESISTENCIA DE PAVIMENTOS .....	55
2.11 NORMATIVA.....	58
2.11.1 Normativa nacional .....	58
2.11.2 Normativa Internacional .....	63
3. METODOLOGÍA.....	65
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	66
3.2 SELECCIÓN DE MATERIAL DE RCD.....	66
3.3 TRANSFORMACIÓN DE RCD EN AR, MEDIANTE TRITURACIÓN.....	68
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	68

3.4.1 Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 $\mu$ m (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado INV E – 214 – 22.....	68
3.4.2 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E – 213 – 22 .....	69
3.4.3 Determinación de componentes del AR.....	70
3.4.4 Densidad, densidad relativa, densidad aparente y absorción del agregado fino INV E – 222 – 22.....	71
3.4.5 Densidad, densidad relativa, densidad aparente y absorción del agregado grueso INV E – 223 – 22.....	72
3.4.6 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles INV E – 218 – 22....	74
3.4.7 Determinación del valor del 10% de finos INV E – 224 – 22.....	75
3.4.8 Solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio INV E – 220 – 22 .....	76
3.4.9 Solidez de los agregados (sin ladrillo) frente a la acción de solución de sulfato de magnesio INV E – 220 – 22 .....	77
3.4.10 Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 22.....	77
3.4.11 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E – 126 – 22	78
3.4.12 Equivalente de arena de suelos y agregados finos INV E – 133 – 22 .	79
3.4.13 Valor de azul de metileno en agregados finos INV E – 235 – 22.....	80
3.4.14 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados INV E – 211 – 22.....	81
3.4.15 Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras INV E – 230 – 22 .....	82
3.4.16 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E – 227 – 22.....	84
3.4.17 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (Angularidad de la fracción fina) INV E – 239 – 22 .....	85
3.4.18 Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 22 .....	86
3.4.19 CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV E – 148 – 22 .....	87
3.4.20 CBR modificado a 4 y 28 días de curado para AR usado como una subbase granular .....	88

3.5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE PAVIMENTOS CON DIFERENTES COMPOSICIONES DE MATERIALES EN SU ESTRUCTURA.....	89
3.5.1 Materiales convencionales en toda la estructura .....	93
3.5.2 AR combinado con material de aporte en la base granular .....	97
3.5.3 AR combinado con material de aporte en la subbase granular .....	100
3.5.4 AR combinado con material de aporte en la base y subbase granular	104
3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE PAVIMENTOS CON DIFERENTES COMPOSICIONES DE MATERIALES EN SU ESTRUCTURA .....	107
3.6.1 Materiales convencionales en toda la estructura .....	108
3.6.2 AR combinado con material de aporte en la base granular .....	108
3.6.3 AR combinado con material de aporte en la subbase granular .....	109
3.6.4 AR combinado con material de aporte en la base y subbase granular	109
3.9 EVALUACIÓN DE VARIACIÓN GRANULOMÉTRICA.....	110
3.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	111
3.11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	111
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	112
4.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN.....	112
4.1.1 Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 $\mu\text{m}$ (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado INV E – 214 – 22.....	112
4.1.2 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E – 213 – 22 .....	113
4.1.3 Determinación de componentes del AR.....	114
4.1.4 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), densidad aparente y absorción del agregado fino INV E – 222 – 22 .....	116
4.1.5 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), densidad aparente y absorción del agregado grueso INV E – 223 – 22 .....	117
4.1.6 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles INV E – 218 – 22..	118
4.1.7 Determinación del valor del 10% de finos INV E – 224 – 22.....	119
4.1.8 Solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio INV E – 220 – 22 .....	120

4.1.9 Solidez de los agregados (sin ladrillo) frente a la acción de solución de sulfato de magnesio INV E – 220 – 22 .....	125
4.1.10 Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 22.....	128
4.1.11 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E – 126 – 22 .....	129
4.1.12 Equivalente de arena de suelos y agregados finos INV E – 133 – 22	129
4.1.13 Valor de azul de metileno en agregados finos INV E – 235 – 22.....	130
4.1.14 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados INV E – 211 – 22.....	131
4.1.15 Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras INV E – 230 – 22 .....	133
4.1.16 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E – 227 – 22.....	135
4.1.17 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (Influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (Angularidad de la fracción fina) INV E – 239 – 22 .....	136
4.1.18 Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 22 .....	137
4.1.19 CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV E – 148 – 22 .....	138
4.1.20 CBR modificado a 4 y 28 días de curado para una subbase granular	141
4.1.20.1 Granulometría de AR como una subbase granular .....	141
4.1.20.2 Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 22 para el AR como SBG – 50 .....	143
4.1.20.3 CBR modificado a 4 días de curado para una subbase granular	144
4.1.20.4 CBR modificado a 28 días de curado para una subbase granular .....	147
4.1.20.5 Crecimiento del CBR del AR en distintos periodos de tiempo.....	150
4.2 DESEMPEÑO ESTRUCTURAL MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE PAVIMENTOS CON DIFERENTES COMPOSICIONES DE MATERIALES EN SU ESTRUCTURA.....	153
4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE PAVIMENTOS CON DIFERENTES COMPOSICIONES DE MATERIALES EN SU ESTRUCTURA .....	163

4.4 EVALUACIÓN DE VARIACIÓN GRANULOMÉTRICA.....	165
4.4.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E – 213 – 22, para BG-40 y SBG-50 ( <i>Granulometría inicial</i> ).....	165
4.4.2 Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 22, para BG-40 y SBG-50 .....	168
4.4.3 Degradación de los agregados pétreos a causa de la compactación por impactos INV E – 243 – 22, para BG-40 y SBG-50 ( <i>Granulometría luego de compactación</i> ) .....	169
4.4.4 Establecimiento de <i>granulometría de trabajo</i> antes de compactación, mediante relaciones matemáticas .....	174
5. CONCLUSIONES .....	176
6. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	179
7. BIBLIOGRAFÍA.....	180
ANEXOS .....	192

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

pág.

Ilustración 1. Residuos de Construcción y Demolición: (a) RCD con distintos componentes, (b) RCD de concreto .....	33
Ilustración 2. Contaminación ambiental por RCD: (a) RCD contaminando el suelo (b) RCD contaminando la flora .....	40
Ilustración 3. Agregado reciclado .....	41
Ilustración 4. RCD usado después de su gestión.....	53
Ilustración 5. Interfaz de usuario en software WESLEA .....	57
Ilustración 6. Ejemplo de resultados obtenidos mediante software WESLEA .....	57
Ilustración 7. Metodología de la investigación .....	65
Ilustración 8. AR usado en estudio: (a) RCD almacenado en planta de tratamiento, (b) RCD, (c) Planta de tratamiento, (d) AR de estudio .....	67
Ilustración 9. Ensayo de determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 $\mu\text{m}$ .....	69
Ilustración 10. Ensayo de análisis granulométrico.....	70
Ilustración 11. Determinación de componentes del AR.....	71
Ilustración 12. Ensayo de gravedad específica de las partículas pasantes del tamiz No.4 y retenido No.200: (a) Material SSS, (b) Medición de gravedad, (c) Pesaje de material con matraz y agua .....	72
Ilustración 13. Ensayo de gravedad específica de las partículas pasantes del tamiz $\frac{3}{4}$ " y retenido No.4: (a) Pesaje de muestra saturada, (b) Determinación de volumen, (c) Método de desplazamiento de agua .....	73
Ilustración 14. Ensayo en máquina de los Ángeles: (a) Pesaje de muestra, (b) Máquina de los Ángeles .....	74
Ilustración 15. Ensayo de determinación de 10% de finos: (a) Equipo de ensayo, (b) Compactación de muestra, (c) Aplicación de carga .....	75
Ilustración 16. Ensayo de solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio: (a) Muestra en solución de sulfato de magnesio, (b) Muestra después de secado en horno con sulfato de magnesio .....	76
Ilustración 17. Ensayo de solidez de los agregados (sin ladrillo) frente a la acción de solución de sulfato de magnesio: (a) Muestra luego de proceso de secado en horno, (b) Lavado de muestra en Cloruro de Bario, (c) Examen cualitativo .....	77
Ilustración 18. Ensayo de determinación del límite líquido de los suelos .....	78
Ilustración 19. Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad .....	79
Ilustración 20. Ensayo de determinación de equivalente de arena: (a) Vaciado de material en probeta, (b) Muestra en reposo .....	80

Ilustración 21. Ensayo de azul de Metileno: (a) Vaciado de material para ensayo, (b) Adición de azul de metileno, (c) Medición de consumo de azul de metileno.....	81
Ilustración 22. Ensayo de partículas deleznable: (a) Saturación de material, (b) Partículas deleznable, (c) Tamizado de material.....	82
Ilustración 23. Ensayo de determinación de índice de aplanamiento.....	83
Ilustración 24. Ensayo de determinación de índice de alargamiento.....	83
Ilustración 25. Ensayo de determinación de caras fracturadas: (a) Equipo de ensayo, (b) Cara fracturadas .....	84
Ilustración 26. Ensayo de determinación del contenido de vacíos: (a) Muestra cayendo, (b) Recipiente lleno, (c) Pesaje de muestra.....	85
Ilustración 27. Ensayo modificado de compactación: (a) Compactación de material, (b) Enrase de muestra en el molde .....	86
Ilustración 28. Ensayo CBR para AR: (a) Humedad óptima, (b) Compactación de muestra, (c) Inmersión del material .....	88
Ilustración 29. Ensayo CBR a 4 y 28 días de curado: (a) Enrase de muestra en molde, (b) Inmersión de muestras, (c) Muestra en ambiente húmedo .....	89
Ilustración 30. Materiales empleados en la estructura de pavimento 1 .....	94
Ilustración 31. Materiales empleados en la estructura de pavimento 2 .....	97
Ilustración 32. Materiales empleados en la estructura de pavimento 3 .....	101
Ilustración 33. Materiales empleados en la estructura de pavimento 4 .....	104
Ilustración 34. Comportamiento inicial del AR en el ensayo de solidez: (a) Material posterior al segundo ciclo en contacto con sulfato de magnesio, (b) Cristalización por sulfatos, (c) Muestra posterior a secado en horno .....	120
Ilustración 35. Comportamiento del AR a partir del tercer ciclo del ensayo de solidez: (a) Material retenido tamiz #50, (b) Material retenido tamiz #40, (c) Material retenido tamiz #16, (d) Material retenido tamiz #8, (e) Material retenido tamiz #4, (f) Material retenido 3/8" .....	122
Ilustración 36. Comportamiento de la fracción gruesa del AR en el ensayo de solidez: (a) Material retenido tamiz 1", (b) Material retenido tamiz 1½" .....	123
Ilustración 37. Ensayo de solidez para la fracción gruesa sin ladrillos: (a) Material luego de proceso de secado en horno, (b) Partículas gruesas luego de secado en horno .....	126
Ilustración 38. Ensayo de azul de metileno .....	131
Ilustración 39. Estructura de pavimento 1 .....	153
Ilustración 40. Estructura de pavimento 2 .....	154
Ilustración 41. Estructura de pavimento 3 .....	157
Ilustración 42. Estructura de pavimento 4 .....	159
Ilustración 43. Desmoronamiento de ladrillo después de compactación .....	171

## ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades de los AR.....	46
Tabla 2. Siglas usadas para clasificación de RCD por el ICONTEC .....	63
Tabla 3. Coeficientes de Calage .....	91
Tabla 4. Configuraciones de pavimentos para evaluar el comportamiento estructural .....	92
Tabla 5. Datos para diseño de pavimento 1 .....	94
Tabla 6. Datos para diseño de pavimento 2 .....	98
Tabla 7. Datos para diseño de pavimento 3 .....	101
Tabla 8. Datos para diseño de pavimento 4 .....	105
Tabla 9. Costos de materiales de pavimento 1 .....	108
Tabla 10. Costos de materiales de pavimento 2 .....	109
Tabla 11. Costos de materiales de pavimento 3 .....	109
Tabla 12. Costos de materiales de pavimento 4 .....	110
Tabla 13. Porcentaje de material fino que pasa el tamiz de 75 $\mu\text{m}$ (No. 200) .....	112
Tabla 14. Granulometría de los agregados grueso y fino del AR .....	113
Tabla 15. Porcentajes de componentes del AR .....	116
Tabla 16. Densidad, densidad relativa (gravedad específica), densidad aparente y absorción del agregado fino .....	117
Tabla 17. Densidad, densidad relativa (gravedad específica), densidad aparente y absorción del agregado grueso .....	118
Tabla 18. Resultados cuantitativos de solidez en sulfato de magnesio.....	124
Tabla 19. Resultados cualitativos de solidez en sulfato de magnesio.....	125
Tabla 20. Resultados cuantitativos de solidez en sulfato de magnesio (AR sin ladrillo).....	126
Tabla 21. Resultados cualitativos de solidez en sulfato de magnesio (AR sin ladrillo) .....	127
Tabla 22. Índice de plasticidad (IP) .....	129
Tabla 23. Equivalente de arena.....	130
Tabla 24. Valor de azul de metileno .....	131
Tabla 25. Porcentaje de terrones de arcilla y de partículas deleznales.....	132
Tabla 26. Índice de aplanamiento .....	133
Tabla 27. Índice de alargamiento .....	134
Tabla 28. Porcentaje de caras fracturadas.....	135
Tabla 29. Porcentaje de vacíos de la fracción fina .....	136
Tabla 30. CBR de AR.....	139

Tabla 31. Cálculo de cantidades para espécimen de 6000 g para granulometría de AR como SBG-50.....	142
Tabla 32. CBR de AR como SBG-50 a 4 días de curado.....	145
Tabla 33. CBR de AR como SBG-50 a 28 días de curado.....	147
Tabla 34. CBR de AR como SBG-50 con 95% de Proctor modificado, para 0, 4 y 28 días de curado.....	151
Tabla 35. Esfuerzos por carga, geostáticos, totales y $\theta$ para módulo resiliente de base granular de pavimento 2.....	155
Tabla 36. Esfuerzos por carga, geostáticos, totales y $\theta$ para módulo resiliente de subbase granular de pavimento 3.....	157
Tabla 37. Esfuerzos por carga, geostáticos, totales y $\theta$ para módulo resiliente de base granular de pavimento 4.....	160
Tabla 38. Esfuerzos por carga, geostáticos, totales y $\theta$ para módulo resiliente de subbase granular de pavimento 4.....	161
Tabla 39. Costo de materiales por km del pavimento tipo 1.....	163
Tabla 40. Costo de materiales por km del pavimento tipo 2.....	163
Tabla 41. Costo de materiales por km del pavimento tipo 3.....	164
Tabla 42. Costo de materiales por Km del pavimento tipo 4.....	164
Tabla 43. Cálculo de cantidades para espécimen de 6000 g para granulometría de AR como BG-40.....	166
Tabla 44. Cálculo de cantidades para espécimen de 6000 g para granulometría de AR como SBG-50.....	167
Tabla 45. Granulometría después de compactación de AR como BG-40.....	170
Tabla 46. Comparación de granulometría inicial vs granulometría luego de compactación de AR como BG-40.....	170
Tabla 47. Granulometría después de compactación de AR como SBG-50.....	172
Tabla 48. Comparación de granulometría inicial vs granulometría luego de compactación de AR como SBG-50.....	173

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Producción de RCD en Colombia .....	35
Gráfica 2. Producción de RCD en el mundo .....	37
Gráfica 3. Gestión de los RCD .....	44
Gráfica 4. Módulo Resiliente de base granular con AR.....	99
Gráfica 5. Módulo Resiliente de subbase granular con AR .....	103
Gráfica 6. Módulo Resiliente de base granular con AR.....	106
Gráfica 7. Módulo Resiliente de subbase granular con AR .....	107
Gráfica 8. Curva granulométrica AR.....	114
Gráfica 9. Componentes del AR.....	115
Gráfica 10. Curva de fluidez .....	128
Gráfica 11. Curva de compactación AR .....	138
Gráfica 12. Curvas esfuerzo vs Penetración de AR para CBR (10, 25 y 56 golpes) .....	140
Gráfica 13. Curva granulométrica AR como SBG-50 .....	142
Gráfica 14. Curva de compactación AR como SBG-50.....	144
Gráfica 15. Curvas esfuerzo vs Penetración de AR como SBG-50 para CBR a 4 días de curado (10, 25 y 56 golpes).....	146
Gráfica 16. Curvas esfuerzo vs Penetración de AR como SBG-50 para CBR a 28 días de curado (10, 25 y 56 golpes).....	149
Gráfica 17. CBR de AR como SBG-50 con 95% de Proctor modificado, para 0, 4 y 28 días de curado.....	152
Gráfica 18. Módulo resiliente para base granular de pavimento 2 .....	156
Gráfica 19. Módulo resiliente para subbase granular de pavimento 3.....	158
Gráfica 20. Módulo resiliente para base granular de pavimento 4 .....	161
Gráfica 21. Módulo resiliente para subbase granular de pavimento 4.....	162
Gráfica 22. Curva granulométrica de AR como BG-40.....	166
Gráfica 23. Curva granulométrica de AR como SBG-50 .....	167
Gráfica 24. Curva de compactación AR como BG-40 .....	168
Gráfica 25. Curva de compactación AR como SBG-50.....	168
Gráfica 26. Curva granulométrica comparativa de AR como BG-40 después de compactación .....	171
Gráfica 27. Curva granulométrica comparativa de AR como SBG-50 después de compactación .....	174

## ÍNDICE DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Deformación unitaria de tracción en la carpeta asfáltica .....	90
Ecuación 2. Deformación unitaria de compresión en la subrasante .....	91
Ecuación 3. Módulo resiliente para subbase granular en pavimento 1 .....	95
Ecuación 4. Módulo resiliente para base granular en pavimento 1 .....	96
Ecuación 5. Módulo resiliente para subbase granular de pavimento 2 .....	99
Ecuación 6. Módulo resiliente para base granular de pavimento 3 .....	103
Ecuación 7. Granulometría de trabajo para cada tamiz de AR .....	174

## LISTA DE ABREVIATURAS

AHR	Áridos de Hormigón Reciclado
AR	Agregados Reciclados
BG	Base Granular
CA	Carpeta Asfáltica
CBR	California Bearing Ratio
CMIC	Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción
DAGMA	Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente
EPA	United States Environmental Protection Agency
FHWA	Federal Highway Administration
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
IdP	Índice de Degradación Proctor
IDU	Instituto de Desarrollo Urbano
INVIAS	Instituto Nacional de Vías
PM	Proctor Modificado
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
SBG	Subbase Granular
SSS	Saturado, superficialmente seco
UAESP	Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos

## RESUMEN

Actualmente, la industria de la construcción presenta una relación directamente proporcional entre el paso del tiempo y la cantidad de obras civiles creadas, manteniendo esta tendencia de manera semejante a periodos anteriores, lo cual conlleva a un desarrollo social y económico, pero también, a la producción de grandes cantidades de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) derivados de tal actividad, generando contaminación ambiental, visual, afectaciones a la salud, entre otros. En Colombia se reportan cerca de 22 millones de toneladas anuales de RCD y a nivel mundial, más de 1,3 billones de toneladas, a menudo sin una adecuada gestión que permita la mitigación de su expansión. Por ello, es de vital importancia tomar medidas que detengan el problema y a su vez lleguen a reducirlo.

Esta investigación examinó el comportamiento de los RCD usados como capas de base y subbase en pavimentos, evaluando sus características, desempeño estructural y viabilidad económica. Para ello, primeramente, se identificó el material de estudio, proveniente de procesos de construcción y demolición ejecutados por parte de empresas constructoras del departamento del Valle y procesados por la empresa Álvaro Vásquez ubicada en el municipio de Puerto Tejada, Cauca, para su posterior aprovechamiento. La caracterización completa de los RCD, se realizó mediante ensayos de laboratorio que determinaron su composición, dureza, forma, limpieza, durabilidad y resistencia, incluyendo su comportamiento en condiciones húmedas en periodos de tiempo prolongados para evaluar su autocementación. En cuanto al análisis del desempeño estructural y la viabilidad económica, se evaluaron cuatro tipos de pavimentos: uno con agregados naturales y tres con diferentes proporciones de RCD en sus capas, para comparar sus comportamientos; respecto al análisis económico, consistió en determinar los costos asociados a las estructuras resultantes de los diseños ya mencionados, para establecer la factibilidad financiera de incluir RCD en este tipo de obras civiles. Además, se evaluó la susceptibilidad a la quiebra de este tipo de materiales después de compactación, y se estableció una granulometría adecuada de trabajo para su uso.

Los ensayos mostraron que el material cumple con los estándares del INVIAS (Instituto Nacional de Vías) establecidos para agregados de base y subbase granular, incluso superando a los agregados naturales en pruebas como el CBR, con una resistencia hasta 36% mayor tras 24 días de curado en relación al día inicial. El análisis estructural reveló que los pavimentos con RCD presentan deformaciones por fatiga y ahuellamiento comparables a los pavimentos con agregados naturales. Económicamente, los costos son similares entre pavimentos con agregados convencionales y los que incorporan RCD. La susceptibilidad a la quiebra del material es baja, y se estableció una granulometría adecuada para su uso. En general, los resultados confirman que los RCD son efectivos para base y subbase

granular, reduciendo impactos ambientales, sociales y apoyando la economía circular en la construcción.

**Palabras clave:** Residuos de Construcción y Demolición, agregados, reciclados.

## ABSTRACT

Currently, the construction industry presents a directly proportional relationship between the passage of time and the amount of civil works created, maintaining this trend in a similar way to previous periods, which leads to social and economic development, but also to production of large quantities of Construction and Demolition Waste (CDW) derived from such activity, generating environmental and visual pollution, health effects, among others. In Colombia, nearly 22 million tons of CDW are reported annually and worldwide, more than 1.3 billion tons, often without adequate management that allows mitigation of its expansion. Therefore, it is vitally important to take measures that stop the problem and in turn reduce it.

This research examined the behavior of RCDs used as base and subbase layers in pavements, evaluating their characteristics, structural performance and economic viability. To do this, first, the study material was identified, coming from construction and demolition processes carried out by construction companies in the department of Valle and processed by the Álvaro Vásquez company located in the municipality of Puerto Tejada, Cauca, for subsequent use. . The complete characterization of the RCD was carried out through laboratory tests that determined its composition, hardness, shape, cleanliness, durability and resistance, including its behavior in humid conditions over prolonged periods of time to evaluate its self-cementation. Regarding the analysis of structural performance and economic viability, four types of pavements were evaluated: one with natural aggregates and three with different proportions of RCD in their layers, to compare their behaviors; Regarding the economic analysis, it consisted of determining the costs associated with the structures resulting from the aforementioned designs, to establish the financial feasibility of including RCD in this type of civil works. In addition, the susceptibility to failure of this type of materials after compaction was evaluated, and an appropriate working granulometry for its use was established.

The tests showed that the material meets the INVIAS (Instituto Nacional de Vías) standards established for granular base and subbase aggregates, even surpassing natural aggregates in tests such as CBR, with a resistance up to 36% greater after 24 days of curing in relation to the initial day. The structural analysis revealed that pavements with RCD present fatigue deformations and rutting comparable to pavements with natural aggregates. Economically, costs are similar between pavements with conventional aggregates and those that incorporate RCD. The material's susceptibility to breakage is low, and an appropriate granulometry was established for its use. In general, the results confirm that RCDs are effective for granular base and subbase, reducing environmental and social impacts and supporting the circular economy in construction.

**Keywords:** Construction and Demolition Waste, aggregates, recycled.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para introducir al tema de estudio es importante abordar los ítems que se desglosan seguidamente.

### 1.1 PROBLEMA

La creciente demanda de innovación y modernización ha provocado un aumento constante en la explotación de recursos naturales, siendo la industria de la construcción una de las principales contribuyentes a este fenómeno. Este sector no solo agota los recursos naturales, sino que también genera contaminación ambiental a lo largo de todo su ciclo, desde la obtención de materias primas hasta la ejecución y demolición de estructuras, haciendo de esto una práctica insostenible (Kumar & Shukla, 2022). El incremento de proyectos de construcción ha intensificado estos problemas, dando lugar a consecuencias adversas como la degradación del medio ambiente, la pérdida de recursos naturales y la generación de riesgos para la salud pública.

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) destacan como contaminantes significativos generados por esta industria, llegando a cifras que ascienden hasta los 22 millones de toneladas de producción anual según reportes ofrecidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y a nivel mundial, su valor de producción anual se acerca a los 1,3 billones de toneladas (Trujillo K. et al., 2021). La generación en aumento de estos residuos, la falta de infraestructura estandarizada para su procesamiento, la limitada disponibilidad de espacios para su disposición, la escasa inversión para su transformación, la ausencia de guías detalladas y regulaciones con pautas que indiquen el proceso a seguir desde la recolección hasta su disposición final, la carencia de estudios minuciosos que señalen la utilización de cada tipo de RCD de acuerdo a su composición, así como la falta de conciencia ambiental, son factores que obstaculizan la implementación efectiva de acciones para aprovechar estos recursos valiosos en otras actividades. Esta situación contribuye a la expansión del problema y sus consecuencias. En este contexto, empresas de construcción, entidades gubernamentales y organizaciones ambientales han reconocido la urgente necesidad de orientar el uso de los RCD hacia soluciones que generen desarrollo y mitiguen sus impactos negativos. Sin embargo, hasta el momento, no se han logrado avances significativos para cumplir eficazmente con este propósito.

Por lo tanto, una alternativa que surge, es plantear la siguiente pregunta: ¿Cuál sería el rendimiento estructural y la viabilidad económica, que se deriva de la implementación de RCD en la pavimentación de carreteras? El objetivo sería darles un uso que reduzca los daños asociados a su producción y sean vistos como un material valioso, innovador y de calidad.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Establecer directrices para la integración de materiales no convencionales, fomentando enfoques novedosos en términos de desarrollo social, ambiental y económico, alineados con las metas actuales de desarrollo mundial y construcción sostenible, destaca la relevancia de evaluar el uso de RCD en pavimentos.

Cabe mencionar que, el sector de la construcción aporta alrededor del 50% de la contaminación de residuos sólidos inorgánicos en el planeta; generando contaminación en el aire, agua y suelo, modificando el ecosistema (Jiménez L. et al., 2019), los cuales en la mayoría de sus casos son susceptibles de involucrarse nuevamente en ciclos productivos.

Los descubrimientos resultantes de esta evaluación son esenciales para desarrollar pautas técnicas que orienten la reutilización de estos materiales, al analizar las ventajas de optar por un agregado reciclado en comparación con uno convencional. La implementación de esta práctica no solo contribuiría a evitar que los residuos de construcción y demolición sin procesar puedan llegar en última instancia a vertederos de residuos sólidos municipales (Agarwal et al., 2022) donde no representan un segundo aprovechamiento de este material, sino que también prolongaría la conservación de recursos naturales al sustituir materiales extraídos por aquellos que reducen la necesidad de extracción.

Además de sus beneficios ambientales, esta iniciativa podría tener impactos económicos positivos y ofrecer características mejoradas para proyectos viales. Pues, la investigación propuesta permite identificar las características del material, su composición y verificar su conformidad con los estándares de calidad a través de ensayos de caracterización que logran definir su uso estructural; además, se puede analizar el impacto económico que se tiene realizando una comparación de pavimentos con diferentes composiciones de materiales, usando RCD en sus diferentes capas, y haciendo combinaciones de este, para poder identificar la variación de costos que se genera de la implementación de este material reciclado, frente a agregados naturales; así como también la realización de una evaluación de la variación granulométrica del material antes y después de la compactación, permite evidenciar cuál sería la quiebra que sufrirían las partículas de manera detallada y con lo cual se puede establecer la granulometría a la cual se debe disponer el material antes de la compactación, con el fin de que luego de este proceso, esta quede dentro de los límites exigidos por la norma INIVIAS, o según sea el caso. Así, es como se puede evidenciar que los procesos y resultados recopilados a través de este estudio representan un avance significativo que

demuestra la viabilidad, relevancia e importancia para la implementación de prácticas sostenibles en la construcción de pavimentos.

### 1.3 ORGANIZACIÓN

Este estudio se estructura en varios capítulos que detallan la información correspondiente a cada uno, contribuyendo así al cumplimiento de los objetivos establecidos para la investigación.

A continuación, se presenta la división del trabajo:

**Capítulo 1. Introducción:** Se aborda el problema de investigación, se justifica su importancia y se establece la hipótesis de estudio al igual que los objetivos que guían la estructura del mismo.

**Capítulo 2. Revisión de literatura:** Se expone información relevante sobre el tema, incluyendo conceptos básicos, la cantidad de residuos de construcción y demolición generados a nivel global y nacional, sus impactos ambientales, gestión, propiedades físico-mecánicas como agregado reciclado, usos técnicos, estudios previos, normativa y otros términos fundamentales relacionados.

**Capítulo 3. Metodología:** Se describe de manera detallada los procesos que se realizaron para desarrollar la investigación y que permitieron el alcance de los objetivos propuestos.

**Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados:** Se presentan los resultados obtenidos en laboratorio, en el análisis estructural y en el análisis económico, al igual que se discute y analizan teniendo en cuenta la normativa relacionada con los mismos.

**Capítulo 5. Conclusiones:** Se muestran las conclusiones determinadas con toda la información recopilada y se da respuesta a la hipótesis de investigación planteada inicialmente.

**Capítulo 6. Recomendaciones para trabajos futuros:** Se proporcionan recomendaciones para futuros trabajos de investigación afines al tema de estudio planteado.

**Capítulo 7. Bibliografía:** Se destacan todas las fuentes de información utilizadas y referenciadas a la temática evaluada.

## **1.4 HIPÓTESIS**

Las propiedades distintivas de los residuos de construcción y demolición los convierten en una opción ideal para propósitos estructurales en la construcción de pavimentos, generando beneficios tanto económicos como medioambientales.

## **1.5 OBJETIVOS**

A continuación, se delimitan los objetivos planteados para esta investigación, los cuales buscan abordar la problemática presentada y lograr sus metas.

### **1.5.1 General**

Evaluar la capacidad de los RCD para ser usados como capas de base y subbase en pavimentos; abordando aspectos de desempeño estructural y análisis económico.

### **1.5.2 Específicos**

- Examinar el desempeño estructural de los RCD usados en pavimentación.
- Evaluar la viabilidad económicamente del uso de RCD en pavimentos.
- Analizar la quiebra y variación granulométrica de los RCD durante el proceso de compactación.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

Para proporcionar una contextualización completa que permita comprender y abordar los objetivos de este trabajo, es imperativo establecer un marco teórico sólido que sirva como base conceptual. Este marco facilita la comprensión de las temáticas de la obra, explorando diversos aspectos relacionados con los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

En primer lugar, se ofrece una definición precisa de qué son los RCD, posteriormente, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de su producción en rangos nacionales e internacionales y los impactos que estos generan en el medio ambiente, así mismo, se conceptualiza el término "agregado reciclado", explorando su relevancia en el ámbito de la construcción; además, se destacan los aspectos relacionados con la gestión de residuos, las propiedades y características inherentes a estos elementos; de la misma manera, el marco teórico contempla una revisión de estudios previos realizados con RCD, proporcionando así un contexto académico esencial; se examinan los potenciales usos técnicos de los RCD, explorando su potencial de aplicabilidad en diversas áreas; el impacto financiero que se crea mediante la reutilización de estos residuos, una descripción del software utilizado para la evaluación estructural de pavimentos y finalmente, se exponen normativas asociadas con los residuos objeto de estudio.

### **2.1 RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)**

Los residuos de construcción y demolición (RCD), anteriormente conocidos como escombros, son los residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparación o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas (Resolución 0472 del 28 de febrero de 2017 “Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017, p. 3)); los componentes típicos de estos residuos incluyen concreto, asfalto, madera, metal, paneles de yeso, tierra y cantidades más pequeñas de materiales de embalaje, como plástico y papel (Cochran et al., 2007), estos elementos que constituyen los RCD pueden variar dependiendo de las características de la obra de donde se realiza su extracción y de su proceso de demolición.

Estos residuos se dividen en dos categorías: aprovechables y no aprovechables. Según lo establecido en el Decreto 2981 de 2013, los residuos aprovechables engloban cualquier material, objeto, sustancia o elemento sólido que, aunque

carezca de valor de uso para su generador, puede ser reutilizado en un proceso productivo. Por otro lado, los residuos no aprovechables son aquellos materiales no susceptibles de reutilización, por lo cual disipan su valor técnico o económico.

Según lo establecido en la resolución mencionada, el grupo de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) susceptibles de aprovechamiento incluye una variedad de materiales, como productos de excavación y sobrantes de la adecuación del terreno, tales como coberturas vegetales, tierras, limos y materiales pétreos resultantes de la excavación. También comprende productos de cimentaciones y pilotajes, como arcillas, bentonitas y otros materiales similares, así como materiales pétreos que incluyen hormigón, arenas, gravas, gravillas, cantos, pétreos asfálticos, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezclas de cementos y concretos hidráulicos, entre otros. Además, este grupo abarca materiales no pétreos, como vidrio, acero, hierro, cobre, aluminio, metales recubiertos o no, con zinc o con estaño, PVC, polietileno, policarbonato, acrílico, espumas de poliestireno, poliuretano, gomas, cauchos, compuestos de madera, cartón-yeso (drywall), entre otros. Por otro lado, los RCD no susceptibles de aprovechamiento incluyen aquellos contaminados por residuos peligrosos, aquellos que por su estado no pueden recuperarse y aquellos con características de peligrosidad, los cuales deben ser gestionados según la normativa ambiental específica.

La Ilustración 1 ofrece una representación visual de los RCD.

*Ilustración 1. Residuos de Construcción y Demolición: (a) RCD con distintos componentes, (b) RCD de concreto*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

## 2.2 GENERACIÓN Y VOLUMEN DE LOS RCD

La creciente producción de RCD se reconoce como un problema crítico a nivel mundial. Esta expansión desproporcionada de su generación plantea preocupaciones significativas, ya que en muchos lugares no se aborda con la debida rigurosidad y tratamiento necesario, lo que podría resultar en daños adversos durante su producción, reutilización o disposición, tales como afectaciones a la salud, al aire, al agua y al suelo (Ma & Hao, 2024). Por tanto, obtener una estimación precisa de los volúmenes generados de estos residuos se convierte en un factor crucial para implementar medidas efectivas enfocadas a mitigar este problema crítico (Hao et al., 2022). Sin embargo, es importante reconocer que la cuantificación precisa de los residuos generados es un ejercicio arduo y que puede incluir ciertos niveles de variabilidad respecto a los valores reales debido a la presencia de vertederos ilegales que obstaculizan este proceso. A pesar de estos desafíos, es posible ofrecer cifras relevantes, las cuales se detallan a continuación.

A nivel nacional, Colombia constituye una cifra considerable a la generación de estos residuos, pues según valores reportados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en su resolución 0472 de 2017, el país ha llegado a alcanzar hasta 22 millones de toneladas de producción anual de RCD, siendo Bogotá una de las ciudades que más contribuye a la expansión de este problema.

Específicamente, debido a su crecimiento urbano y construcción de infraestructura, Bogotá ha llegado a reportar valores de producción de RCD de 12 millones de toneladas según estudios realizados por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), entidad encargada de la prestación de servicios públicos de aseo, alumbrado y servicios funerarios en equipamientos de la ciudad.

En otras ciudades tales como Medellín, se estima que su producción de RCD está alrededor de 2 millones de toneladas anualmente, lo que representa aproximadamente el 9% de todos los RCD generados en el país, clasificándose entonces como el segundo mayor productor de estos elementos después de la capital (Rodríguez & Terán, 2018).

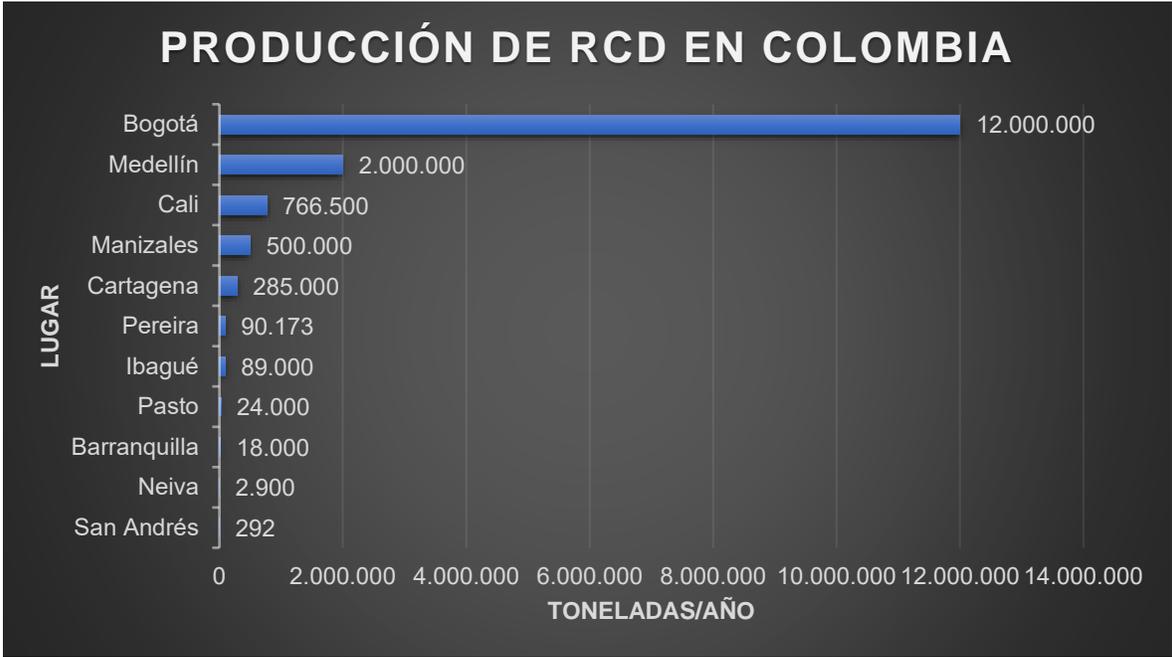
Cali, es otro lugar con una cantidad considerable de producción de RCD, impulsado por su latente crecimiento urbano, la capital Vallecaucana diariamente genera cerca de 2.100 toneladas de estos residuos, de las cuales 500 provienen de las pequeñas obras que los ciudadanos realizan en sus hogares o establecimientos de comercio (Núñez, 2023), resultando en una producción de alrededor de 766.500 toneladas anuales, lo que constituye un aporte del 3,5% de este problema a nivel nacional.

Manizales reporta unas cifras de generación de RCD de casi 500.000 toneladas (Rodríguez & Terán, 2018), ocupando el lugar de cuarto mayor productor de RCD a nivel nacional, con un aporte del 2,3% al volumen de residuos de construcción y demolición producidos anualmente en el país.

Ciudades como Cartagena, Pereira, Ibagué, Pasto, Barranquilla, Neiva y San Andrés aportan 285.000, 90.173, 89.000, 24.000, 18.000, 2.900 y 292 toneladas de RCD respectivamente (Latorre, 2017), que, aunque son cantidades menores en comparación a las ciudades que son grandes productoras de RCD, estas cifras contribuyen al ensanchamiento de esta problemática.

La Gráfica 1 muestra un resumen de las principales ciudades generadoras de RCD en Colombia, con sus respectivos valores anuales asociados mediante esta recopilación de la información.

Gráfica 1. Producción de RCD en Colombia



Fuente: Elaboración propia de la autora.

En el contexto global, se han llegado a identificar valores de producción cercanos a 1,3 billones de toneladas de desechos sólidos de construcción por año y se prevé que esta cantidad aumente a 2,2 billones de toneladas para el año 2025 (Trujillo &

Quintero, 2021), estos residuos producidos mundialmente aportan aproximadamente el 50% del total anual de residuos sólidos generados.

En ese sentido, en países como China, los residuos de construcción y demolición han aumentado sustancialmente debido a su rápido desarrollo urbano e industrial (Ma & Hao, 2024), anualmente, dentro de su población se producen aproximadamente 2.600 millones de toneladas (Hao et al., 2022), contando con una tasa de reciclaje de alrededor del 30% a nivel mundial (C. Zhang et al., 2022).

De acuerdo a cifras reportadas en la hoja informativa de United States Environmental Protection Agency (EPA) en el año 2018, en ese periodo de tiempo se generaron 600 millones de toneladas de escombros de construcción y demolición en los Estados Unidos, lo que representa más del doble de la cantidad de desechos sólidos municipales generados, de los cuales solo aproximadamente 455 millones de toneladas de estos residuos se destinaron al siguiente uso y poco menos de 145 millones de toneladas se enviaron a vertederos (EPA, 2021) ; alcanzando así una tasa de reciclaje del 76% (Ma & Hao, 2024).

India, que se caracteriza por ser el segundo mayor consumidor de recursos naturales no metálicos y uno de los mayores productores de RCD del mundo, con más de 100 millones de toneladas de residuos de construcción y 300 millones de toneladas de residuos de demolición generados anualmente, tiene una tasa de reciclaje muy baja correspondiente al 1%, que representa su desentendimiento por parte de los habitantes y de los entes gubernamentales ante esta problemática (HaitherAli & G, 2024).

En el continente europeo, las cifras más recientes que se reportan en cuanto a producción de RCD pertenecen al 2016, año en el cual el continente alcanzó una producción correspondiente a 112,7 millones de toneladas (Santos & Tubino, 2021) con una tasa de recuperación del 89% y, por tanto, elevada en comparación con otros flujos de residuos (Caro et al., 2024).

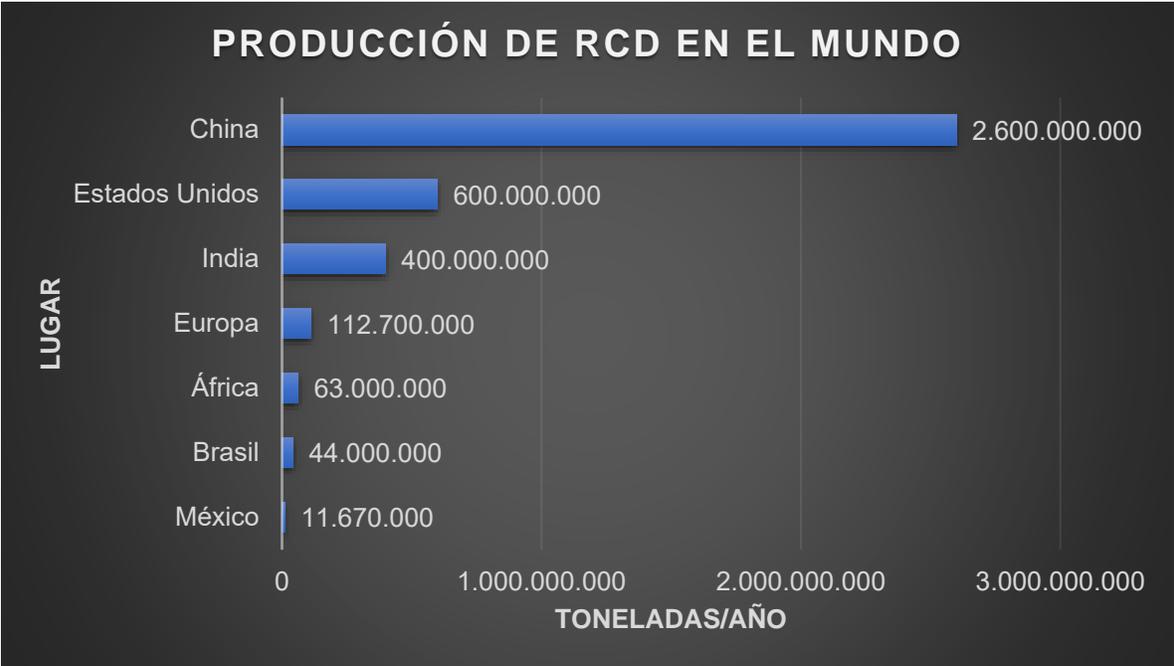
África, ha reportado cifras de producción de residuos de construcción cercanas a los 63 millones de toneladas por año (Rodriguez Guerra & Baca-Cajas, 2022), según datos recopilados en el año 2012, del cual es el último que se tiene información hasta la fecha, lo cual puede interpretarse como un desentendimiento ante tal situación.

En Brasil, cada año se generan más de 44 millones de toneladas de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), lo que equivale a más del 50% del total de residuos sólidos urbanos. Sin embargo, solo se recicla el 6,14% de este volumen, mientras que la mayor parte termina en vertederos inactivos o se deposita en terrenos abandonados y a lo largo de las carreteras (Santos & Tubino, 2021).

México, en un escenario estimado por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC, 2022), registra una generación estimada de residuos de 11,67 millones de toneladas en el año 2022, lo cual representa una producción de 32.450 toneladas de residuos diariamente.

La Gráfica 2 presenta un panorama de los principales lugares generadores de RCD a nivel global, destacando los valores anuales correspondientes obtenidos de esta recopilación de datos.

Gráfica 2. Producción de RCD en el mundo



Fuente: Elaboración propia de la autora.

## 2.3 IMPACTOS AMBIENTALES

La construcción, aunque es fundamental para el crecimiento económico y la revitalización, es una de las principales contaminantes y generadora de daños al medio ambiente, dada la ejecución de sus procesos; desde la extracción de materiales no renovables y fabricaciones, hasta su uso en la construcción y demolición, trayendo consigo efectos adversos al medio ambiente (Oviedo Cogollo & Vega Suárez, 2022).

El consumo de recursos y la generación de residuos está mayormente impulsado por este sector (C. Zhang et al., 2022), lo que conlleva, en muchas ocasiones, a un deterioro ambiental sustancial, como también a la creación de condiciones insalubres derivadas de una gestión inadecuada de los residuos generados por la actividad constructiva.

Específicamente, la generación, manejo y disposición final asociados con los residuos de excavaciones, construcciones y demoliciones resultantes de todo este proceso, tienen un impacto significativo al medio ambiente, tales como la contaminación del aire, la contaminación del agua, la degradación de los suelos y la alteración de ecosistemas (Secretaría Distrital de Ambiente, 2021), pues su mala disposición, así como la carencia de una concientización que permita disminuir este problema, son factores que amplían la distancia entre las intenciones de su mitigación para disminuir la problemática asociada y su producción que cada día va en aumento.

Relacionado con la contaminación del aire, se tiene que las partículas son el principal contaminante de este medio, las cuales se generan durante la demolición y el procesamiento de este tipo de materiales. Esta contaminación puede tener graves implicaciones para la salud humana, ya que la exposición a material particulado llega a provocar efectos tales como enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso aumentar el riesgo de muerte prematura (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Cabe hacer hincapié, que, aunque este efecto provocado por los RCD se puede considerar grave, al analizar los efectos de la contaminación del aire asociados con la producción de áridos reciclados y agregados naturales, es evidente que los áridos reciclados presentan ventajas significativas en términos de huella de carbono; pues, estudios como el de (Abedin Khan et al., 2024) han demostrado una reducción notable en las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la producción de áridos reciclados en comparación con los agregados naturales; mientras que la producción de una

tonelada de agregado grueso natural mediante piedras trituradas emite alrededor de 32 kg de CO<sub>2</sub> eq de Gases de efecto invernadero (GEI), la producción de agregado grueso reciclado a partir de residuos de construcción y demolición emite alrededor de 11 kg de CO<sub>2</sub> eq de GEI; dado el alto volumen de material requerido diariamente, esta diferencia en la huella de carbono plantea una cuestión importante a considerar al evaluar las ventajas y tomar decisiones sostenibles.

En relación a la contaminación del agua, la gestión inadecuada de los RCD tiene un impacto significativo en las fuentes hídricas cercanas. La liberación de sustancias tóxicas procedentes de gases nocivos y la lixiviación de materiales, facilitada por la presencia de materia orgánica y otros contaminantes (Muñoz et al., 2014), contribuyen a la contaminación de ríos, lagos, lagunas y arroyos. Estos contaminantes pueden ser transportados por escorrentía, infiltración o simplemente dispersión, lo que afecta adversamente la calidad del agua, la biodiversidad acuática y la salud de quienes dependen de este recurso vital.

La acumulación y disposición incorrecta de los RCD también pueden causar degradación y erosión del suelo (Mejía et al., 2014) lo que conlleva a la pérdida de su calidad edáfica. Esta pérdida puede ser irreversible incluso después de retirar los residuos (Marián et al., 2011). Los RCD pueden contener materiales como pinturas, solventes, aceites, metales pesados y otros productos químicos tóxicos, que pueden infiltrarse en el suelo y generar alteraciones como infertilidad, contaminación de las especies vegetales y animales que dependen del entorno natural, así como contaminación de las aguas subterráneas.

El manejo inadecuado de los RCD puede tener consecuencias significativas en la alteración de ecosistemas, lo que se traduce en perturbaciones en los ciclos de vida de diversas especies, tanto de flora como de fauna, alterando su dinámica natural. Esta alteración puede llevar a la interrupción de cadenas productivas vitales en algunos casos, mientras que en otros puede resultar en la destrucción directa de hábitats. Estas perturbaciones pueden ser el resultado tanto de la mala disposición de los RCD como de la introducción de especies invasoras favorecidas por las condiciones generadas por estos residuos. Sin embargo, es importante mencionar que, con el propósito de prevenir que los RCD se conviertan en una carga ambiental persistente, se ha fortalecido recientemente la implementación estratégica de su incorporación en infraestructura geoambiental; enfoque que posibilita la efectiva neutralización de carbono (Bordoloi et al., 2022), lo cual resulta de un desarrollo adecuado en cada fase del proceso de reutilización de los RCD, abarcando desde su clasificación hasta su incorporación en nuevos usos.

En la Ilustración 2 se representan distintos tipos de impacto ambiental que se pueden ocasionar debido a la inadecuada gestión y disposición de los RCD, por ejemplo, contaminación del suelo, obstaculización del desarrollo de la fauna por la

presencia de estos residuos, polución, contaminación de las fuentes hídricas cercanas por medio de escorrentía que contenga material contaminante, etc.

*Ilustración 2. Contaminación ambiental por RCD: (a) RCD contaminando el suelo  
(b) RCD contaminando la flora*



(a)

(b)

Fuente: Elaboración propia de la autora.

## **2.4 AGREGADO RECICLADO (AR)**

Una vez que los materiales categorizados como residuos de construcción y demolición han pasado por un proceso de transformación con la intención de ser reutilizados e incorporados posteriormente, sometiéndolos a condiciones particulares para su uso, estos agregados adquieren valorización. En consecuencia, ya no se les considera como residuos, sino como agregados reciclados, aptos para ser reintegrados en nuevas actividades.

La calidad de estos agregados ocasionalmente puede verse afectada positiva o negativamente según los procesos de demolición empleados para su obtención en su sitio de procedencia, así como su selección y los procesos de tratamiento desarrollados en las plantas de valorización. Por ello, es importante destacar que

estos agregados reciclados son materiales muy variables, guardando similitud con la extracción de agregados naturales de múltiples canteras; por lo tanto, resulta fundamental conocer las características de la obra de donde se extrae el material y su composición, ya que este último factor es crucial para controlar la heterogeneidad de los distintos lotes de agregados reciclados que llegan a obtenerse; la acotación de esta variabilidad se puede lograr por medio de los porcentajes de los componentes presentes en el material, teniendo en cuenta cómo se comporta el material de acuerdo a los rangos de sus elementos que lo componen.

La Ilustración 3 muestra un agregado reciclado producido a partir de RCD.

*Ilustración 3. Agregado reciclado*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

## **2.5 GESTIÓN DE LOS RCD**

Los RCD susceptibles de aprovechamiento siguen un mecanismo típico para lograr un proceso de gestión sostenible. Este modelo implica varias etapas, organizadas según un criterio de priorización que enfatiza las acciones de prevención y reducción de la generación de residuos, reservando la disposición final como último recurso, conforme lo establece la Resolución 0472 del 2017 emitida por el Ministerio de Ambiente en Colombia y como lo recomiendan diversos autores expertos en el campo. Estas actividades se detallan a continuación:

- **Prevención y reducción:** Consiste en una implementación de medidas para fomentar la prevención y reducción de RCD adoptadas por los generadores de estos residuos, las cuales deben incluir una planeación adecuada de la obra para evitar dispendios de materiales, así como también una separación y almacenamiento por tipo de componente de los RCD en obra y un control de flujos de agua que puedan afectar el material.
- **Recolección y transporte:** Una vez identificado el punto de generación de residuos, es crucial que el proceso de recolección sea llevado a cabo por vehículos debidamente autorizados para esta tarea. En el caso específico del Distrito Capital, estos vehículos recolectores deben estar registrados en la base de datos de la Secretaría Distrital de Ambiente para poder llevar a cabo sus funciones.

Durante el proceso de recolección y transporte de los materiales, es fundamental resaltar la importancia de fragmentar el material en trozos manejables y realizar la separación de los RCD en la fuente, de acuerdo a sus componentes. Es necesario eliminar los materiales nocivos para evitar su contaminación, la imposibilidad de su reincorporación al ciclo productivo (Secretaría de Ambiente de Bogotá) o la necesidad de aumentar la capacidad de limpieza en la planta de disposición. Además, se debe llevar a cabo un control exhaustivo desde el momento del cargue, hasta su llegada al lugar de destino, que evite la dispersión de partículas y el contacto con la lluvia o el viento; esto se logra asegurando que el material esté correctamente posicionado en el vehículo transportador y cubierto durante el desplazamiento. Los vehículos utilizados para esta actividad deben cumplir con todas las normativas vigentes en materia de tránsito, transporte y emisiones atmosféricas.

- **Almacenamiento:** Para almacenar los RCD en un punto limpio, designación que describe el área de almacenamiento temporal autorizada antes de su transformación, se requiere llevar a cabo un proceso de pesaje y documentación conforme a la normativa vigente en ese momento; en esta fase, también es importante, en el caso de que los materiales no estén separados previamente según sus constituyentes, como se expuso anteriormente, la ejecución de la debida preselección o triage de los mismos, que en la mayoría de los casos comprenden concreto, mortero, cerámicos, ladrillos, vidrio, asfalto, madera, PVC, etc., para finalmente hacer su agrupación de acuerdo a su tipo. Estos sitios de almacenamiento deben contar con barreras que minimicen el impacto visual de los materiales, sistemas de drenaje y control de sedimentos debidamente estructurados, así

como una señalización adecuada y medidas dirigidas a la minimización de la dispersión de partículas.

- **Aprovechamiento:** El material se somete a un proceso de aprovechamiento, en plantas designadas, que pueden ser móviles o fijas, y que mínimo deben estar constituidas por un área de recepción y pesaje, separación y almacenamiento por tipo de RCD aprovechables, así como una zona de aprovechamiento y un espacio destinado al almacenamiento de los productos finales.

Inicialmente, se realiza la recepción del material y se diligencia una ficha técnica, donde se detallan sus características, así como su peso, para llevar un control de estos valores, tal como lo exija la normativa vigente. Seguidamente, el material RCD aprovechable se separa de materiales que puedan ser no aprovechables y que no se dividieron en un primer proceso de selección. Luego, estos RCD se almacenan en un lugar especificado para cada tipo en la planta de aprovechamiento, con la intención de someterlo a su proceso de trituración en la zona de aprovechamiento, donde generalmente este proceso inicia sometiendo el material a molturación con una trituración primaria por medio de mandíbulas, que una vez realizan este trabajo, pasa a una unidad clasificadora por medio de bandas para su ordenamiento por tamaños, preparándolo así para la segunda fase de trituración, donde de la misma manera una vez culminado este proceso, se clasifican los agregados reciclados y quedan listos para su uso. Este se debe almacenar en un lugar adecuado antes de su reincorporación al ciclo productivo.

- **Disposición final:** Los RCD que no puedan ser reciclados ni valorizados deberán disponerse en sitios debidamente autorizados por las entidades regionales o locales para tal propósito, que cumplan con las autorizaciones y especificaciones pertinentes para garantizar una disposición final adecuada de los residuos.

En la Gráfica 3 se sintetiza el proceso de gestión de los RCD.

Gráfica 3. Gestión de los RCD



Fuente: Elaboración propia de la autora.

## 2.6 PROPIEDADES DE LOS AR

El estudio de las propiedades físico mecánicas exhibidas por los AR proporciona información crucial para el conocimiento de su composición, dureza, durabilidad, limpieza, geometría de sus partículas, resistencia, densidad, absorción, entre otras características relevantes que además son fundamentales para evaluar la calidad y el desempeño de estos en diversos contextos de aplicación.

En lo que respecta a las propiedades mecánicas exhibidas por los AR en general, estudios recientes han arrojado resultados reveladores donde se demuestra que con este tipo de residuos se tiene un comportamiento similar y en algunos casos mejor que los obtenidos con áridos naturales (Peña et al., 2018).

Al evaluar ciertas características específicas, los agregados reciclados muestran una mayor absorción de agua, menor gravedad específica, una textura superficial más irregular y un contenido de humedad óptimo más bajo para pruebas de compactación, en comparación con los agregados extraídos de fuentes naturales (Leite et al., 2011).

Otra característica o componente importante de los AR es el cemento, pues la composición de cemento como silicato de calcio hidrata y ayuda a mejorar el contacto y la unión entre partículas (Kim et al., 2024), creando su capacidad de autocementación que va ligada al comportamiento mecánico del material, demostrada en estudios como el llevado a cabo por (Wang et al., 2023) donde a través de ensayos de laboratorio realizados a distintos tipos de AR, se demostró que esta propiedad asemeja al material a uno ligeramente tratado; pues gracias al proceso de trituración al que deben someterse previo a su utilización, llegan a quedar al descubierto partículas cementicias que no habían sido hidratadas, produciendo así este fenómeno, además representado por un aumento constante del módulo resiliente mientras es sometido a curado durante distintos periodos de tiempo y que resultó superior en 4,3 veces en el día 720 a comparación al medido inicialmente en el día 1.

En análisis como el realizado por (Bastidas Martínez et al., 2022) donde llevaron a cabo una revisión exhaustiva de literatura en cuanto a los valores reportados en ensayos de caracterización física de materiales, realizados a distintos tipos de AR sacando un promedio de estos valores reportados y su porcentaje de desviación, encontraron resultados para el ensayo de Desgaste en la Máquina de los Ángeles, Micro-Deval, Valor de 10% de finos, Valor de agregado de trituración, Índice de alargamiento, Índice de fragilidad, Partículas planas o alargadas, Partículas fracturadas, Angularidad del agregado fino, Equivalente de arena, Azul de metileno, Cantidad de sulfato de sodio, Peso específico aparente de la fracción gruesa, Peso específico Bulk de la fracción gruesa, Peso específico saturado superficialmente seco de la fracción gruesa, Absorción de agregados gruesos, Gravedad específica de la fracción fina, Gravedad específica aparente de la fracción fina, Gravedad específica Bulk de la fracción fina, Gravedad específica saturada superficialmente seca de la fracción fina, Absorción de la fracción fina y Gravedad específica del conjunto tal y como se muestran en la Tabla 1, donde se puede notar una dispersión elevada de algunos valores, la cual puede surgir por la heterogeneidad de los AR, pero que brinda información que permite tener una estimación del comportamiento físico de estos materiales, además de que todos estos valores demuestran su similitud de comportamiento con los agregados naturales revelando así la calidad y posible utilización del árido en aplicaciones de ingeniería.

Tabla 1. Propiedades de los AR

Propiedad física	Valor promedio	Coefficiente de variación CV (%)
Máquina de abrasión Los Ángeles (LA)	31,4%	20.9
Micro-Deval	30,0%	11.8
Valor de 10% de finos	134,5kN	16.3
Valor agregado de trituración (ACV)	23,8%	23.4
Índice de alargamiento	17,1%	50
Índice de fragilidad	15,8%	52.3
Partículas planas o alargadas	6,8%	93,9
Partículas fracturadas	96,2%	3.2
Angularidad del agregado fino	57,6	30,8
Equivalente de arena	65,4%	26,7
Azul de metileno	2.8	50,5
Cantidad de sulfato de sodio	31,2%	40.4
Peso específico aparente grueso	2.5	5.9
Peso específico Bulk grueso	2.4	4.2
Gravedad específica saturada superficie seca gruesa	2.5	2.7
Absorción gruesa	5,3%	25.4
Gravedad específica fina	2.5	8.6
Gravedad específica aparente de la fracción fina	2.6	5.9
Gravedad específica Bulk fina	2.3	13.8
Gravedad específica saturar superficie seca fina	2.3	10
Absorción fina	7,3%	69.2
Gravedad específica del material	2.5	0

Fuente: Tomado de (Bastidas Martínez et al., 2022)

Por otro lado, estudios más específicos, destinados a medir la relación de soporte de California (CBR) de los AR han informado rangos de 76 a 130% para diferentes lotes de agregados probados en diferentes tiempos de recolección después de 4 días de inmersión. Estos valores mejoraron al aumentar el tiempo de remojo en agua hasta 90 días hasta el rango de 138 a 185% de CBR, lo que podría deberse al potencial aglutinante restante del cemento en el concreto triturado (Vegas et al., 2011), que es una características única y propia de estos agregados para aumentar su rigidez.

Con el propósito de evaluar el comportamiento de los AR ante cargas cíclicas del tráfico (Amorim et al., 2023) realizaron ensayos de Módulo resiliente en la Universidad de Brasilia, elaborando probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de

altura, cuya composición consistió en un 75% de agregado natural y un 25% de AR, donde estos últimos estaban compuestos a su vez por un 50% de hormigón, 35% de materiales de albañilería y un 15% de restos de pavimentos, dejando las probetas en curado durante 1, 7, 15, 30, 60, 90 y 180 días y usando 3 ejemplares por periodo de curación; donde los resultados demostraron una variación del módulo resiliente en función del tiempo, de manera directamente proporcional; la muestra obtuvo su crecimiento más acelerado durante los primeros 15 días de curado, que de igual manera continuó al transcurrir los días, pero con una menor intensidad de crecimiento. Los valores máximos de este ensayo de Módulo de Resiliente para agregados reciclados alcanzaron valores de hasta 116 a 239 MPa.

En pruebas de laboratorio destinadas a obtener valores de ensayos estándar para los componentes de la estructura de un pavimento correspondientes a ensayos de CBR y módulo resiliente, (Gómez & Farias, 2012) encontraron porcentajes de CBR del 98% para agregados reciclados sin inmersión en agua y hasta de 128% para muestras inmersas en agua durante 96 horas, provenientes del proceso de demolición del estadio Mané Garrincha de Brasil; este fenómeno de incremento en el valor de CBR ante la presencia de agua se atribuye a la hidratación del material cementante presente en la muestra y que se encuentra en concordancia por lo exigido en la normativa de la Federal Highway Administration (FHWA) donde se estipula un requerimiento del 94% y 148% en la prueba de CBR para agregados reciclados y de igual manera en la norma Brasileña NBR 15115/04 Y 15116/04 que de manera similar exige un porcentaje mínimo de CBR del 60%, por otro lado, en cuanto a las cifras alcanzadas en el ensayo de módulo resiliente que se realizó en periodos de cura de 1, 7, 15, 30, 60 y 90 días y con las 3 energías de compactación, estas muestran que el material alcanzó sus mayores incrementos de resistencia dentro de los 7 primeros días de curado, disminuyó al alcanzar un periodo de 15 días ante condiciones de humedad y se estabilizó posterior a 60 días; el material osciló entre 70 y 600 MPa que corresponde a valores similares para los de un agregado natural.

(Ji & Wang, 2023) Analizaron la relación constitutiva del hormigón con agregado grueso de ladrillos de desecho en diferentes proporciones de adición para la creación de muestras distintas de concreto, evidenciando cómo un porcentaje excesivo de ladrillo puede ser un componente perjudicial en los agregados reciclados, dadas sus propiedades de porosidad, baja resistencia y susceptibilidad elevada a la quiebra; al someter el conjunto a ensayos de tracción uniaxial donde se contaba con proporciones de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% de adición de ladrillo rojo en la mezcla, evidenciando que dada las características del ladrillo, la integridad del hormigón después de la compresión disminuye gradualmente con el aumento de la tasa de reemplazo del agregado del ladrillo, afectando también su tensión máxima, esfuerzo máximo y módulo de elasticidad. Además se evidenció cómo la absorción de agua es un factor importante a tener en cuenta también en el uso de

estos materiales con componentes elevados de ladrillo o que aumenten su porcentaje de absorción, pues se mostró cómo la resistencia a la compresión a 28 días llegó a reducirse en un 26,1% y 11,9 %, para una proporción de mezcla estándar con hormigón reciclado de ladrillos de desecho y otra semejante pero teniendo en cuenta el método de consumo de agua adicional, el módulo de elasticidad también se vio afectado ante esta situación, el cual llegó a reducirse en un 23,9 % y 22,9 % respectivamente.

Otra característica relevante que se debe tener en cuenta al emplear agregados reciclados en la construcción de pavimentos es que la rotura de las partículas generada durante el proceso de compactación es un parámetro importante que afecta la elegibilidad de las mismas (Zeghal, 2009) dada su probable susceptibilidad a la quiebra, que se da en casi todos o todos los materiales de este tipo una vez se realiza su proceso de compactación, generando en el variabilidad en su composición por la degradación de sus agregados que resulta incluso mayor que cuando este ya está en su etapa de servicio. En ese sentido, (Alvarez et al., 2019) en su investigación denominada “Evaluación de la degradación por compactación de materiales granulares tipo subbase” revelan cómo los agregados son degradados por la incidencia de la compactación, conduciendo a la producción de partículas más finas, incrementando el peso unitario seco del material, cambios en su granulometría y reducción a la respuesta mecánica, lo cual se traduce en menor rigidez y por lo tanto disminución en su capacidad de soporte, mostrando además que esta trituración se presenta desde las capas superiores hacia las capas inferiores, con mayor incidencia durante las primeras aplicaciones de carga, por lo cual este fenómeno debe ser tratado con especial cuidado cuando se haga la utilización del material en distintos contextos.

## **2.7 UTILIZACIÓN Y ESTUDIOS ANTERIORES DE LOS AR**

Encontrar materiales alternativos, que sean innovadores y a su vez permitan reducir los impactos ambientales, económicos y sociales generados por la extracción de agregados vírgenes destinados a su uso para propósitos de construcción o que sean una solución para la escasez de recursos de este tipo que se presenta en ciertas zonas, es necesario para aportar tecnologías innovadoras y reducir el problema asociado.

Es así que el reciclaje de materiales es una actividad que ya ha tenido una trascendencia a lo largo del tiempo, implementado con la intención de solventar las cuestiones mencionadas; estos comenzaron a ser usados desde 1920 en Holanda, después de la segunda guerra mundial, cuando se usaron como material básico

para la obtención de agregados en la fabricación de concreto Portland y de concreto asfáltico. A partir de 1970, dada la crisis del petróleo, también se desarrollaron investigaciones para viabilizar la reutilización del concreto asfáltico (Gómez & Farias, 2012) sentando así las bases de la posibilidad de introducción de estos materiales a nuevos ciclos productivos.

Según (Contreras et al., 2016) la posibilidad de utilizar residuos de construcción civil combinados con aditivos (cemento y cal) como materias primas en la fabricación de nuevos materiales de construcción como ladrillos de bajo coste para muros de mampostería es amplia, pues en particular, muestras denominadas como TSC2-20/30 y TSL1-30/70 en su investigación, presentan propiedades tecnológicas que enmarcan la posibilidad de su aplicación, demostrada por una resistencia a la compresión que asciende hasta los 4 MPa, que superan los valores exigidos por la normatividad correspondiente.

(Beja et al., 2020) por su parte, realizaron un estudio, en el cual sometieron agregados reciclados de residuos de construcción y demolición con cemento Portland y cal hidratada como subbase de pavimento en Sao-Paulo, Brasil, usando pistas de prueba de pavimento en una ubicación con elevado volumen de tráfico pesado; la estructura estuvo compuesta por hormigón asfáltico en la capa de rodadura, pavimento de asfalto recuperado con material estabilizado con betún para la capa de la base, agregados reciclados para la capa de subbase y agregados de piedra triturada gruesa como capa de refuerzo de la subrasante; al final de la prueba, los resultados observados permitieron revelar que los agregados de RCD se pueden utilizar con éxito como material de subbase de pavimento bajo cargas de tráfico pesado, además, de que la rigidez del agregado RCD aumentó con el tiempo, esto evidenciado mediante la medición del módulo resiliente del material medido una vez se compacto y posterior a 18 meses de este proceso.

De acuerdo a lo presentado por (Yaghoubi et al., 2021) son varias las propiedades que permiten determinar la reutilización de los áridos de hormigón reciclado (AHR) en campos por ejemplo como la pavimentación, donde se demuestra un desempeño óptimo, evidenciado en su caso, por la respuesta a la tensión deformación de estos residuos usados en tal estructura, donde por medio de una prueba triaxial cíclica, que además la dividía en 10 subcapas de igual espesor, para medir el módulo resiliente teniendo en cuenta las diferentes tensiones verticales y de confinamiento que sufre el agregado al variar la profundidad, y por medio de este determinar la relación esfuerzo deformación que sufría el suelo ante presiones de hasta 185 kPa; se reportó que el material pudo mostrar un módulo resiliente mejor que agregados vírgenes convencionales ante estas condiciones. Asimismo, (Pourkhorshidi et al., 2020) en su investigación, en la cual revisa los estudios que se refieren al uso de agregados de residuos de construcción y demolición en capas no ligadas de

pavimentos y compara los resultados disponibles de varias evaluaciones de ingeniería de estos agregados y mezclas, determina que aunque generalmente el reuso de estos agregados se realiza en las capas no ligadas del pavimento, sus propiedades demostradas a través de ensayos para medir su incorporación de la misma manera en capas ligadas del pavimento, da respuestas favorables y permite su implementación.

En la investigación de (Muñoz et al., 2021) nombrada “La influencia de los RCD en reemplazo de los agregados para la elaboración de concreto: Una revisión de literatura.” Se demostró cómo la sustitución de agregados naturales por agregados reciclados es una alternativa para reducir la contaminación asociada a la producción de concreto, así como una disminución en los costos de material y por consiguiente en el coste total de la obra, evidenciado por la determinación de un porcentaje adecuado de reemplazo de material correspondiente a porcentajes no mayores de 50% y de preferencia en combinación con agregados finos.

(Zhang et al., 2021) evaluaron el desempeño de hormigón reciclado (RCA), pavimento de asfalto recuperado (RAP) y mezclas con agregados naturales en distintas combinaciones para ser usados como capas de base en un pavimento durante un periodo mayor a 8 años, en un clima de bajas temperaturas y cargas de tráfico establecidas, para determinar qué factor ocasionaba mayor daño en el pavimento, para lo cual se dejó un carril habilitado para el paso de vehículos y el otro quedó restringido; finalmente, tras todo su estudio, descubrieron que las combinaciones que incluían cierto porcentaje de agregados reciclados en su composición mostraron mejor rendimiento que aquellas que incluían 100% de agregados naturales y las variaciones climáticas estacionales resultaron afectar el rendimiento del pavimento de manera más crítica que la carga del tráfico acompañado de que la calidad de rodadura del pavimento en términos de IRI se mantuvo similar para todos los casos.

(Kuttah, 2023) Realizó catorce tipos de mezclas asfálticas en caliente con materiales reciclados de pavimento asfáltico, arena de fundición, escoria de acero y agregado natural a diferentes proporciones, donde dichas combinaciones llegaron a incluir hasta 98% de árido reciclado y fueron sometidas a pruebas de deterioro, desgaste de la superficie, fricción, así como una inspección visual que demostraron la posibilidad de obtener mezclas de pavimentación con un alto contenido de materiales reciclados.

(Gurumallappa et al., 2023) Construyó bloques de hormigón con residuos de construcción y demolición reciclados, para extraer un producto comercial de alto valor y alta calidad que, a su vez, satisficiera la creciente demanda de recursos para

la construcción, como arena y agregados, reemplazando los agregados naturales de manera natural o parcial, con tamaños entre 6 y 12 mm, evaluando y analizando la resistencia de los bloques con la especificaciones correspondientes de mampostería, donde se encontraron resultados que revelaban la aprobación del uso del material, permitiendo reducir la cantidad de RCD mediante su implementación en objetos sostenibles y por ende la extracción y consumo de agregados vírgenes.

Mediante el estudio de (Borges et al., 2023) se consolidan las inferencias de la aplicabilidad de los RCD en amplias actividades, tales como la creación de mortero; el autor presenta evidencias a partir de las propiedades físico mecánicas y propiedades microestructurales medidas que demuestran que el material puede utilizarse en dicha aplicación.

De este modo, se subraya la relevancia de introducir tecnologías innovadoras en el ámbito de la ingeniería civil, pues, la reutilización de RCD no solo conlleva beneficios ambientales, sino que también contribuye a la economía circular, generando impactos positivos en el ámbito social y económico, como señala (Jiménez & García, 2016)

## 2.8 USOS TÉCNICOS O GENERALES DE LOS AR

Los áridos reciclados, al demostrar su potencial técnico para diversas aplicaciones, representan una alternativa prometedora en las obras civiles contemporáneas. En un mundo donde la búsqueda de materiales alternativos para la construcción es cada vez más crucial (Kumar & Shukla, 2022), es imperativo explorar nuevas posibilidades. En este contexto, a continuación, se muestran algunos de los usos técnicos de los RCD con normas que pueden usarse para su aplicabilidad, destacando su relevancia en la economía circular, la sostenibilidad ambiental y la innovación en la industria de la construcción.

- **Vías:** En el ámbito de la infraestructura vial, los RCD emergen como una valiosa alternativa para mejorar la sostenibilidad y eficiencia de los pavimentos. Estos materiales pueden desempeñar un papel crucial en las capas no ligadas de pavimentos flexibles, tanto en la base como en la subbase (Garzón et al., 2022), en estructuras más robustas, como las losas de pavimentos rígidos, así como también en rellenos y taludes (Liu et al., 2022).

En el país, se tiene la implementación de esta práctica guiada por la normativa del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) ET 2018, la cual establece directrices para la

incorporación de agregados reciclados en las capas de bases y subbases granulares de las carreteras, pero solo a nivel distrital.

- **Concreto:** El proceso de creación de concreto requiere la incorporación de agregados gruesos y finos con propiedades de resistencia definidas, en el cual los RCD encuentran aplicación, además, estos materiales pueden ser utilizados tanto en la producción de concreto (Gurumallappa et al., 2023) reforzado como no reforzado, contribuyendo a mejorar su desempeño y sostenibilidad.

La normativa técnica colombiana NTC 174 de 2018 aborda la reutilización de RCD en concretos. Además, en 2021, entró en vigor la NTC 6421, que establece directrices precisas para la reintegración de agregados reciclados en la producción de concretos, garantizando su calidad y cumplimiento de los estándares establecidos.

- **Mortero (Pega y pañete):** El RCD tras su proceso de gestión, se convierte en un recurso altamente aprovechable para la elaboración de mortero (Borges et al., 2023) de pega y pañete. Sus propiedades específicas lo hacen especialmente adecuado para esta actividad, ofreciendo ventajas tanto en términos de rendimiento como de durabilidad.

- **Mampostería (Prefabricados):** Los RCD han demostrado ser idóneos para la creación de prefabricados (Bagarić et al., 2020) tales como adoquines, bordillos, bovedillas, etc., donde sus características permiten obtener un elemento de propiedades importantes para mampostería estructural y no estructural.

Las normas técnicas colombianas que regulan la aplicación para este tipo de productos y que se considera pueden ser aplicables para la utilización de RCD en tal caso son las NTC 4026 y NTC 4076.

- **Obra blanca:** Los elementos cerámicos, por ejemplo, a los que se les pueda dar un segundo uso, son susceptibles de uso para ser empleados nuevamente en pisos o actividades decorativas, pero esta vez en forma de mosaicos.

- **Filtros y soporte:** Los RCD dado que posterior a su proceso de transformación se convierten en agregados reciclados, donde su composición está determinada por agregados gruesos y finos, en el caso de que en esta se cuente con material granular (Grava y gravilla y arena de soporte) de características aptas para ser

usados como filtros y soporte de terreno tal como un relleno, amplia la posibilidad de utilización en esta actividad.

- **Energía:** En algunos casos, los RCD que no son susceptibles de aprovechamiento en la obra civil, y se catalogan como combustibles, pueden ser sometidos a un proceso de incineración para generar energía que contribuye así a la producción de energía renovable. Tal acción debe ser regulada por la empresa que realiza la operación de acuerdo al material que será sometido a este procedimiento.

La Ilustración 4 muestra un RCD usado como elemento decorativo tras un proceso de gestión para tal empleabilidad.

*Ilustración 4. RCD usado después de su gestión*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

## **2.9 IMPACTOS FINANCIEROS DE LA UTILIZACIÓN DE AR**

La introducción de materiales no convencionales en un campo específico a menudo genera preocupaciones asociadas con los costos elevados, ya que su llegada al mercado suele implicar precios iniciales más altos que un material regularmente utilizado. Sin embargo, al considerar el reuso de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en aplicaciones como obras ingenieriles, se ha observado que estos materiales pueden tener costos inferiores a los tradicionalmente empleados. Además, este costo podría llegar a reducirse aún más, con una demanda incrementada de estos materiales.

Propuestas como la creada por (Quintero, 2022) evidencian cómo el uso de RDC genera alteraciones financieras en el campo de la pavimentación, pues, en su estudio del impacto del uso de RCD en carreteras terciarias, demostró que esta implementación incide positivamente en el desarrollo de estos caminos dada su reducción de hasta un 15% de costos en comparación con la construcción de una vía en la cual se emplean agregados convencionales, dado que, entre otras cosas, se minimizan costos de transporte y de explotación de canteras o fuentes de material.

Además, teniendo en cuenta que una base de pavimento y una capa de subbase de buena calidad reducen el espesor de la estructura y permiten una construcción más rentable, como señalan (Kumar & Shukla, 2022), características atribuibles a los RCD dadas sus propiedades incluso mejores que los agregados convencionales exhibidas por un CBR elevado al igual que el valor de módulo resiliente, especifican cómo estas condiciones particularmente buenas, y que demuestran la calidad del agregado reducen los costos asociados a la pavimentación de carreteras en comparación con un agregado convencional.

Proyectos como el llevado a cabo por (García, 2023) también demuestran la viabilidad técnica y económica de emplear estos residuos en capas estructurales de pavimento. Estos estudios no solo resaltan el potencial beneficioso de los RCD en esta aplicación específica, sino que también evidencia el fomento de una economía circular; lo cual no solo contribuye al desarrollo sostenible a nivel nacional, sino que también se alinea con tendencias globales en la promoción de prácticas más sostenibles. El impacto positivo de la integración de RCD en la construcción de pavimentos no solo se limita a la mejora de la eficiencia económica y técnica, sino que también marca un paso hacia un desarrollo más sostenible tanto a nivel local como global, promoviendo prácticas que benefician al país como al mundo en general.

En el trabajo de (Abera, 2022) se demuestra cómo la recuperación y utilización de RCD ha experimentado un notable aumento, impulsado por su aparente durabilidad, fácil disponibilidad y costos económicos competitivos.

En Colombia, por ejemplo, el Gobierno Nacional, a través del Ministerio del Medio Ambiente (2022), ofrece beneficios tributarios a aquellas entidades que implementen el cuidado por el medio ambiente en sus instituciones, reduciendo así costos en obra de manera semejante; se ofrecen descuentos del Impuesto sobre la Renta por las inversiones en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente, exclusiones al IVA para los bienes que se venden en el territorio nacional asociados al desarrollo de actividades que generan impactos ambientales positivos,

entregas de equipos y elementos para sistemas de control y monitoreo ambiental, así como equipos para reciclar y procesar basuras, depuración y tratamiento de aguas residuales, emisiones atmosféricas o residuos sólidos, entre otros, siendo esto un incentivo importante, ya que crea un efecto de reducción en las obligaciones ya mencionadas y promueve el uso de los RCD por medio de ellos. En esa línea, la alcaldía mayor de Bogotá en su Decreto 586 de 2015 también establece la asignación de beneficios financieros a quienes implementen el uso de RCD en sus construcciones, para lo cual cuenta con una línea denominada “Línea Programática para la promoción de mecanismos e incentivos para la generación de RCD” que se encarga de desarrollar estrategias para orientar al cambio cultural, social, ambiental y empresarial de la reutilización y reciclaje este tipo de residuos, entregando beneficios económicos a los agentes relacionados con la gestión, aprovechamiento y fiscalización del adecuado tratamiento de estos residuos.

## **2.10 SOFTWARE PARA EVALUAR LA RESISTENCIA DE PAVIMENTOS**

El análisis del comportamiento estructural de un pavimento constituye un pilar esencial en la definición de su diseño, requiriendo un enfoque meticuloso que considere los diversos factores externos que puedan influir en su rendimiento. Para asegurar un desempeño óptimo frente a exposiciones externas, resulta crucial emplear métodos de diseño que sean tanto eficientes como realistas. Por lo tanto, es fundamental contar con un conocimiento previo del manejo interno del software utilizado en estas actividades y en particular, en esta investigación, así como comprender los fundamentos subyacentes que guían su funcionamiento, lo cual es necesario para validar o producir nuevamente la información aquí presentada.

El diseño de pavimentos abarca diversos enfoques, cuya elección depende de las características específicas de la obra y los estándares de calidad establecidos. En este caso, al evaluar el comportamiento estructural de pavimentos con composiciones de materiales diversos, se optó por el método racional o computacional (MEPDG), el cual se integra en el software WESLEA utilizado en este estudio para modelar, evaluar y determinar la aceptabilidad de los 4 tipos de estructuras propuestas a analizar, permitiendo establecer ajustes según sea necesario. Este método, reconocido como uno de los más completos, combina elementos empíricos y mecanicistas, utilizando modelos matemáticos para analizar el comportamiento del pavimento y considerando parámetros relevantes que podrían influir en su desempeño; además, se basa en la experiencia, recopilación de información de campo y observaciones del desempeño de pavimentos similares, lo cual lo convierte en la elección más apropiada para este caso.

El método racional implica la caracterización dinámica de los materiales que conforman las capas de la estructura, enfocándose en estudiar sus propiedades mecánicas y su desempeño frente a cargas dinámicas asociadas al tráfico vehicular. Inicia mediante la creación de un modelo que representa la estructura del pavimento, el cual se construye a partir del entendimiento de sus espesores y propiedades elástico-dinámicas. Al aplicar este método, resulta crucial considerar factores como el volumen de tráfico vehicular, expresado en el número de ejes equivalentes de carga durante una etapa de diseño específica, así como evaluar las condiciones climáticas y ambientales pertinentes al lugar. Además, se deben tener en cuenta variables como la caracterización de la subrasante y las capas granulares, mediante la determinación de parámetros como el módulo resiliente y la relación de Poisson y para las mezclas asfálticas destinadas a la carpeta asfáltica, se determina su módulo dinámico obtenido a través del ensayo triaxial dinámico con cargas repetitivas, lo que permite establecer la relación entre esfuerzos y deformaciones en diversas condiciones ambientales, así como su susceptibilidad a la deformación, ya que toda esta información es necesaria para que el programa realice su procesamiento de los datos.

Weslea abarca todas las variables que pueden influir en la respuesta de un pavimento ante factores que podrían afectarlo, como se detalló previamente. De esta manera, el software posibilita la anticipación y predicción del rendimiento de los pavimentos que indica cómo responde este cuando actúan las cargas de los neumáticos, indicando la respuesta que se obtiene de acuerdo a valores de esfuerzo, deformación y desplazamiento, resultados útiles para predecir la vida útil del pavimento en términos de fatiga y ahuellamiento; que posteriormente se compararon con los valores de deformación admisible determinados por normativas específicas empleadas, con el fin de prevenir fallas por fatiga y fallas por acumulación de deformaciones o ahuellamiento, respectivamente. Además, es importante mencionar que el software funciona para evaluación multicapas, es decir que considera todas las capas del pavimento y su interacción, permitiendo definir estándares de calidad y resistencia que posibilitan la comprensión de su rendimiento a largo plazo, dada la capacidad de identificar puntos donde este no reporte un desempeño adecuado, gracias a que cuenta con la utilización de elementos finitos en su análisis, lo que implica que se basa en modelos matemáticos para realizar evaluaciones mecánicas detalladas de la estructura del pavimento, por lo cual los valores aquí obtenidos son muy similares a condiciones realistas y proporcionan información veraz para predecir el comportamiento de este tipo de estructuras viales.

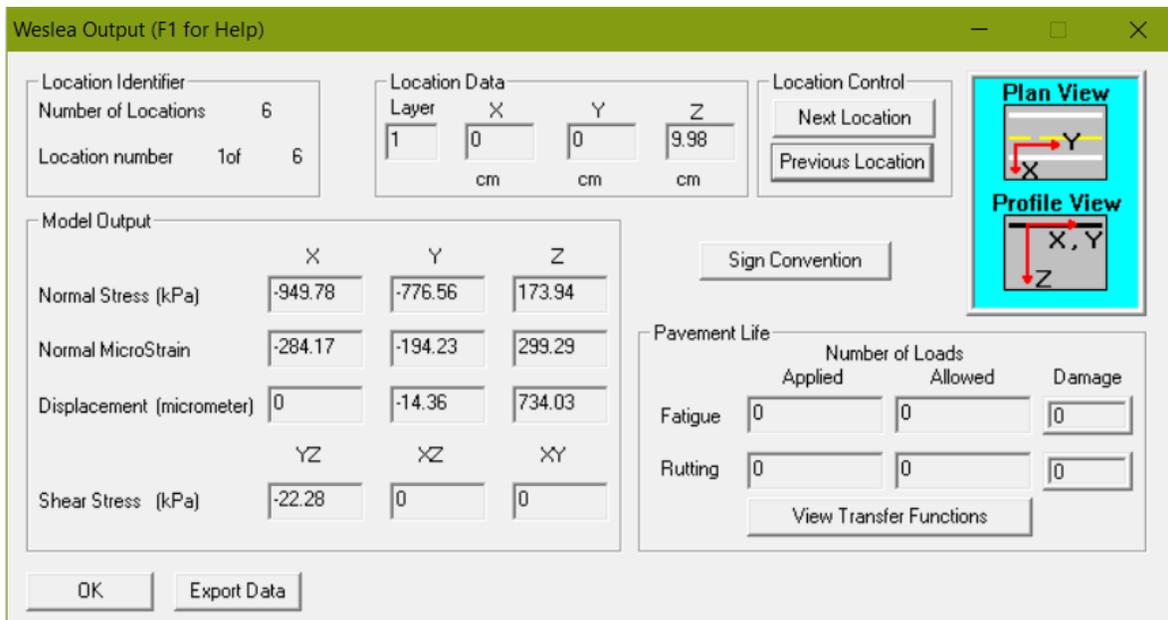
La Ilustración 5 muestra la interfaz de usuario proporcionada por WESLEA, así como también en la Ilustración 6 se puede visualizar un ejemplo de resultados obtenidos mediante el manejo del programa.

Ilustración 5. Interfaz de usuario en software WESLEA



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Ilustración 6. Ejemplo de resultados obtenidos mediante software WESLEA



Fuente: Elaboración propia de la autora.

## 2.11 NORMATIVA

Para una gestión efectiva y un reuso adecuado de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en funciones de crear control en su generación, preservar calidad y planificar una correcta producción para su reutilización o disposición final, es esencial tener en cuenta las normativas y especificaciones pertinentes. Estas regulaciones han surgido como respuesta al creciente volumen indiscriminado de estos elementos, convirtiendo su inspección en una prioridad tanto a nivel nacional como internacional.

**2.11.1 Normativa nacional.** Actualmente, existen pautas en el país, que instruyen sobre cómo reducir, evitar la incorrecta disposición de RCD y hacer su respectiva gestión, abarcando aspectos relacionados con la demolición selectiva, la separación de materiales, el transporte, aprovechamiento o la disposición final y las responsabilidades de los generadores, entre otros factores fundamentales que garanticen una gestión adecuada de estos residuos, sin embargo, la carencia de regulaciones que orienten a detalle cómo se debe hacer su implementación técnica en caso de reutilización en aplicaciones específicas de la construcción civil que es el campo de reuso para estos elementos, es una brecha que separa las intenciones de ejecutar estas acciones a llevarlas a la práctica; por lo cual a nivel país, actualmente solo se han creado normativas encaminadas a la gestión de las cuales se hace mención seguidamente.

La legislación nacional instruida a la gestión de RCD con la cual se incursionó en el país, corresponde al Decreto 357 de 1997 expedido por la Alcaldía Mayor de Bogotá, por el cual se regula el manejo, transporte y disposición final de escombros y materiales de construcción, nombrados de tal manera hasta ese momento, estipulando las conductas, obligaciones, sanciones y procedimientos que se debían realizar en lo que tenía relación con estos residuos y avivando una moción por la reducción de este problema en el territorio.

En años posteriores, se continuó con la intención de la disposición y reutilización correcta de estos residuos, dado el panorama de contaminación que estaban generando; esta iniciativa se materializó a través de la Resolución 2397 de 2011, emitida por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, donde se establecieron los parámetros técnicos para regular la gestión de estos “escombros” en el distrito capital, enfocados a mitigar la contaminación ambiental y proteger la salud pública, ejecutando su reincorporación al ciclo económico productivo en forma ambientalmente eficiente mediante prácticas como la reutilización y el reciclaje; es de destacar que esta ley exigía la transición hacia una economía circular para el

material, pero no brindaba la orientación suficiente sobre cómo aplicar los residuos transformados. La norma estipulaba una reincorporación de RCD en las obras públicas y privadas ubicadas en zonas urbanas, de mínimo un 10% y 5% respectivamente, de acuerdo con el total de los metros cuadrados a construir por la entidad anualmente y del total de metros cuadrados del proyecto en componentes no estructurales para cada uno de los casos, donde cada año dicho porcentaje debería aumentar en 5 unidades porcentuales hasta alcanzar mínimo un 25%.

Luego, surge la Resolución 1115 de 2012 expedida por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, que aplica para la capital del país, donde por medio de esta se acogen los lineamientos Técnico-Ambientales en el distrito capital para el aprovechamiento y tratamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) - nombre ya asignado para tales residuos- estableciendo regulaciones aplicables a entidades públicas, constructoras, grandes generadores, poseedores de RCD, sitios de tratamiento, transportadores y lugares de disposición final. Estas estipulaciones incluyen definiciones clave, obligaciones específicas para cada actor, pone a disposición un sistema de registro en línea que se deberá efectuar a través de la página de la Secretaría Distrital de Ambiente por parte de los generadores, transportadores, plantas de tratamiento y/o aprovechamiento y los sitios de disposición final, con el fin de tener toda la información requerida para su debida supervisión, y delimitan el procedimiento y las sanciones para aquellos que incumplan con las normativas ambientales establecidas. Además, se estipulaba la inclusión obligatoria o reutilización del 5% del total de volumen o peso del material usado en la obra a construir por la entidad anualmente; a partir del año 2013 que entró a regular esta resolución, ya se debió iniciar con esta obligación, y se exigía incrementar 5 puntos porcentuales anualmente, hasta llegar a un aprovechamiento mínimo del 25%.

En el año 2015 se emite el Decreto 586 por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, donde se adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los escombros en la ciudad de Bogotá, el cual propende por su mayor recuperación y reincorporación en los procesos constructivos de la ciudad, por medio de la participación de los agentes del ciclo, el uso de herramientas e infraestructuras y su implementación a través de líneas programáticas de prevención, así como también líneas para el aprovechamiento, reciclaje y reutilización, de la misma manera para la implementación del modelo de gestión, otras relacionadas con el desarrollo de infraestructuras, líneas de gestión, evaluación, control y seguimiento ambiental, líneas de investigación, desarrollo e innovación tecnológica, una línea programática para la promoción de mecanismos e incentivos para la gestión de RCD y una línea programática para la actualización, evaluación y seguimiento al modelo de gestión de estos residuos; cada una a corto, mediano y largo plazo, integrándolas de manera articulada con la actuación en los aspectos ambientales, sociales y económicos. El RCD, según esta política, será

aplicable a todas las instituciones públicas, privadas, personas naturales o jurídicas que desarrollen actividades que generen, posean, transporten, procesen y/o realicen cualquier actividad de gestión de manejo de Residuos de Construcción y Demolición, anteriormente conocidos como escombros, en la ciudad de Bogotá D.C.

Con el propósito de avanzar en los planes de gestión de RCD en Bogotá, se promulgó la Resolución 0932 en el año 2015, creada por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, que enmienda y complementa la Resolución 1115 de 2012. Esta normativa adopta los Lineamientos Técnico-Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los RCD en la ciudad. Entre sus disposiciones, se establecen obligaciones para los grandes generadores y poseedores de RCD, se especifican requisitos para el plan de gestión, se establecen sanciones por disposición ilegal y se incluyen formularios anexos. El logro fundamental de esta resolución fue la implementación de un registro obligatorio en la página web de la Secretaría para los generadores de más de 6 m<sup>3</sup> de RCD y los constructores en áreas superiores a 5000 m<sup>2</sup>. Este registro exige la presentación de un plan de gestión de los RCD, evidenciando el tratamiento adecuado posterior a su generación. Asimismo, se introdujeron formatos obligatorios para los productores de RCD que cumplan con alguna de las dos actividades mencionadas, facilitando así el seguimiento y aprovechamiento de los RCD en las obras.

Posteriormente, entra en vigencia la Resolución 0472 de 2017, emitida por el Ministerio de Ambiente y de aplicación a nivel nacional. Esta resolución establece un marco integral y estructurado para la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), enfocado en su aprovechamiento y que brinda definiciones importantes para realizar este proceso de manera exitosa. Se basa en la reutilización de estos materiales en un porcentaje no menor al 2% del peso total de los residuos generados en las obras. Esta normativa asigna metas de cumplimiento para los municipios categorizados en diferentes niveles. Para los municipios clasificados en las categorías especiales 1, 2 y 3 (Población entre 30.000 a 500.000 habitantes), se establece como fecha límite para alcanzar este objetivo el mes de enero de 2018. En contraste, para los municipios categorizados como tipo 4, 5 y 6 (Población entre 1 a 500.000 habitantes), el plazo se extiende hasta enero de 2023. La resolución establece un aumento progresivo del porcentaje de aprovechamiento, incrementando en 2 puntos porcentuales anuales, con el fin de alcanzar un mínimo del 30% de RCD aprovechables en el peso total de los residuos generados en obras.

Con la intención de ejecutar un programa de manejo ambiental de los RCD y modificar la Resolución 0472 de 2017 teniendo en cuenta que las exigencias de la norma eran un tanto más amplias a la gestión a las que se podían someter los RCD bajo mecanismos de producción eficiente y sostenible, el Ministerio de Ambiente en la Resolución 1257 del año 2021 aplicable a nivel nacional, en las metas de

aprovechamiento separa las metas de las ciudades como categorías y separa las municipalidades por categorías 1, 2 y 3 al igual que 4, 5 y 6. Exige el cumplimiento de la meta de incorporación de aprovechamiento de RCD del 25% en la categoría especial para el 1 de enero de 2023, la categoría 1, 2 y 3 el 15%, la categoría 4, 5 y 6 el 5%; estos cumplimientos van incrementando en aprovechamiento hasta llegar al 1 de enero de 2030 a un aprovechamiento en categoría especial del 75%, en categorías 1,2 y 3 del 60% y de 40% en categorías 4, 5 y 6. Esta resolución además hace énfasis en que estos porcentajes son solamente aplicables sobre los RCD generados en obra y no sobre el volumen o peso total de la obra como se establecía en la regulación anterior a esta modificación.

La secretaría distrital de Bogotá, en vista de esta modificación nacional, incorpora en parte de sus lineamientos de aprovechamiento bajo el Decreto 507 de 2023, porcentajes modificados sobre el aprovechamiento de RCD que ya serán respecto al peso total de la obra y no sobre la cantidad propia de RCD, presentando para enero de 2023 un cumplimiento de aprovechamiento del 25%, para enero de 2024 el 30%, para enero de 2025 el 40%, para enero de 2026 un 50%, para enero de 2027 un 55%, para enero de 2028 un 60%, para enero de 2029 un 70%, hasta llegar a un 75% de aprovechamiento de lo RCD generados en enero de 2030. De la misma manera, establece otra meta de circularidad bajo el mismo decreto, donde en el capítulo 7 de lineamientos sobre la incorporación de prácticas circulares en la construcción, se especifica que para edificaciones públicas o privadas de uso residencial o comercial, se debe incorporar el 5% en peso de materiales de construcción provenientes de la valorización de RCD pétreos o no pétreos respecto del peso total de los materiales de construcción usados en obra; la meta se debe empezar a cumplir desde la fecha que entra en vigencia esta normativa, es decir desde el 31 de octubre de 2023, y se incrementará un punto porcentual al año, hasta llegar a un 20% de incorporación del total del peso o volumen de la obra. En cuanto a la infraestructura vial, esta norma exige una incorporación del 20% en peso de materiales provenientes de la valorización de RCD con respecto del peso del total de los materiales de construcción usados en la obra; lo cual se debe cumplir a partir de la inmersión del decreto, es decir, desde el 31 de octubre de 2023, incrementándose un punto anualmente hasta llegar al 35%.

En cuanto a otros departamentos, en el sur del país, el departamento del Valle encaminado por su Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente "DAGMA" establece mediante el decreto 0771 del año 2018, los parámetros a seguir para el correcto reciclaje de Residuos de Construcción que están asociados a la normativa distrital y nacional para este propósito. Al igual que otras ciudades enfocadas a la contribución de procesos para tratamientos aplicables a los RCD, correspondientes a las ciudades de Barranquilla y Medellín, las cuales por medio de su Resolución 1482 de 2017 y la Circular 100-0017 respectivamente, tratan aspectos relacionados con tal problemática y semejantes a los expuestos con anticipación.

En cuanto a las normativas encaminadas a la aplicabilidad técnica de AR por medio de su incorporación en actividades productivas, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) de Bogotá, que aunque cuenta con una regulación escasa sobre este tema, es la única ciudad del país con normativas aplicables a nivel distrital para cumplir con el propósito ya mencionado, así como lo muestra su especificación 511 de 2018 “BASE Y SUBBASE GRANULAR PARA VÍAS VEHICULARES CON AGREGADOS RECICLADOS OBTENIDOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN RCD” regida al distrito capital, establece las actividades de suministro, transporte, colocación, humedecimiento o aireación, extensión y conformación, compactación y terminado de material granular de agregados reciclados para ser utilizado como base en un tránsito tipo 1 o subbase granular en los 3 tipos de tránsito que pueden presentarse en la estructura de un pavimento, acompañado claramente de las normas aplicables para la aceptabilidad del material en cuanto a sus características, las cuales generalmente están referenciadas a la normativa INVIAS usadas para tal determinación de uso de este tipo de agregados. En ese sentido del reuso de los Residuos de Construcción y demolición en actividades de infraestructura, en el año 2018, también se establece la especificación 513 emitida por el mismo Instituto de Desarrollo Urbano “SUBBASE GRANULAR PARA VÍAS PEATONALES Y CICLORUTAS CON AGREGADOS RECICLADOS OBTENIDOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN RCD”, que como su nombre lo indica, instruye el uso de RCD en vías peatonales y ciclo rutas, empleando las mismas consideraciones que en la norma mencionada anteriormente.

Entidades nacionales como el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), también han enfocado parte de su trabajo en cuestiones afines con los RCD, es por eso que se creó la norma NTC 6422 de 2021 basada en la norma Europea UNE-EN 933-11 donde describe el proceso para realizar una correcta clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados, y así conocer de manera precisa el porcentaje de estos, la norma define unas siglas para cada elemento que se pueda encontrar en el RCD tal y como se muestra en la Tabla 2, lo que permite nombrar estos elementos de una manera más estandarizada a nivel global y clasificarlos como aprovechables principales y aprovechables secundarios.

*Tabla 2. Siglas usadas para clasificación de RCD por el ICONTEC*

Rc	Concreto, productos de concreto, mortero y unidades de albañilería de concreto.
Ru	Agregados no tratados, piedra natural, agregados tratados con cementantes hidráulicos.
Rb	Unidades de albañilería de arcilla (ladrillos, tejas).
Ra	Material bituminoso.
X	Otros: acero, plásticos, madera, caucho, yeso.

Fuente: Elaboración propia de la autora.

De la misma manera, la norma NTC 6421 de 2021, expedida también por el ICONTEC, establece los requisitos de calidad y da orientaciones de uso para los agregados gruesos reciclados (AGR) para uso en el concreto hidráulico estructural y no estructural, estableciendo las especificaciones que deben cumplir estos agregados para demostrar su calidad.

La última norma emitida por el ICONTEC en relación a los RCD, corresponde a la NTC 6656 del año 2023 donde establece la recuperación de material de base de agregados reciclados para la creación de pavimento de concreto asfáltico reciclado, proporcionando pautas sobre la calidad que debe tener el material, medida a través de ensayos de laboratorio, así como sus condiciones de operación para obtener un material con resultados admisibles de calidad y resistencia.

**2.11.2 Normativa Internacional.** Relacionado con las normas internacionales para la mitigación de los impactos relacionados con la producción de RCD, se han desarrollado, por ejemplo, empezando por el continente americano, la NOM-161-SEMARNAT-2011 expedida por el gobierno mexicano, la cual establece un plan Nacional para el manejo de los Residuos de la construcción, estableciendo para los productores de una generación superior a los 80 m<sup>3</sup> la formulación y desarrollo de un plan que contemple dicho manejo.

Por su parte, Brasil, ha sido otro de los países interesados en crear una concientización y mitigación eficaz en lo que respecta a residuos en general y específicamente a residuos de Construcción y Demolición desde el año 2002 con la resolución CONAMA No. 307, estableciendo criterios importantes para su prevención, transformación y uso, así como también la entrega de recursos a municipalidades de ser necesarios para realizar dicha moderación. De igual manera las normas NBR 15115 de 2004 y la NBR 15116 de 2004 establecen los procedimientos de ejecución de pavimentos y morteros u hormigones usando áridos

reciclados respectivamente, brindando un enfoque más acertado y detallado acerca de dicha aplicación.

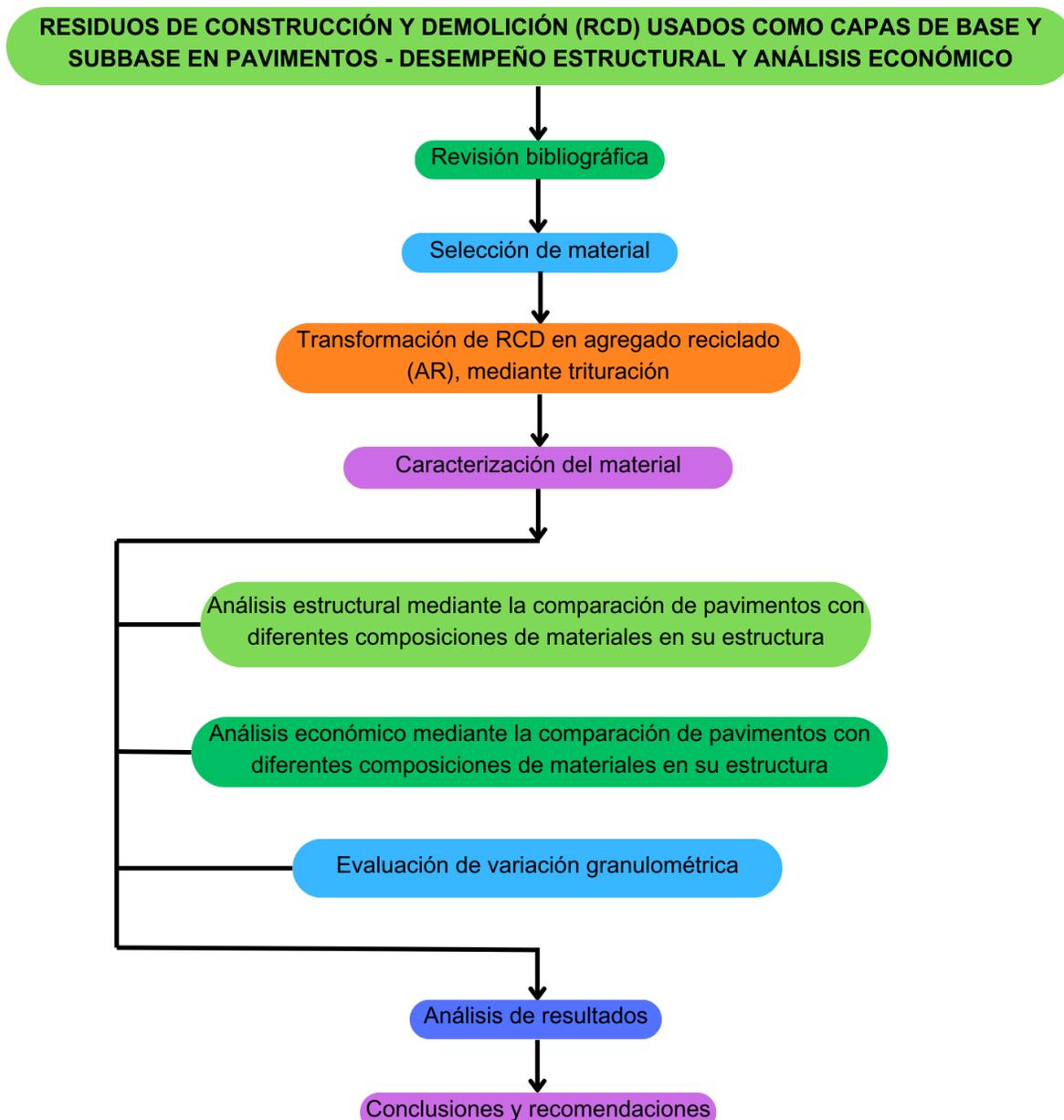
En el continente Europeo, la legislación establecida para la regulación de RCD corresponden a la normas UNE-EN 12620 (2009), UNE-EN 13242 (2008) y UNE-EN 13139 (2003) que establecen las pautas para el uso de RCD como agregados para hormigón, capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes y para agregados para morteros respectivamente y que por consiguiente pueden ser usadas para tal aplicación en actividades de pavimentación, lo cual resulta de un arduo proceso e investigación para establecer la correcta reutilización de estos residuos debido a necesidades surgidas desde el año de 1975 (Quiñones, 2014). Además, en el año 2016, directrices establecidas en la Comisión Europea del respectivo año constituyeron un “Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE” con el objeto de implementar una gestión adecuada y de innovación para tales residuos.

En el documento FHWA-RD-97-148 (2008) expedido por la Administración Federal de Carreteras (FHWA), del Departamento de Transporte de los EE. UU., también se tratan cuestiones relacionadas con los RCD, pues en este, se dan las directrices para el uso de materiales de desecho y subproductos en la construcción de pavimentos, detallando cuales son aptos para tal aplicación y poniendo a disposición una guía detallada para hacer la evaluación de la viabilidad de esta ejecución de manera correcta.

### 3. METODOLOGÍA

Para realizar la investigación, fue esencial seguir un procedimiento organizado como se muestra en la Ilustración 7. A continuación, se presentan explicaciones detalladas de cada paso ejecutado para facilitar su comprensión.

*Ilustración 7. Metodología de la investigación*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Se llevó a cabo una recopilación de información relevante para obtener fundamentos teóricos destacados sobre el tema de investigación. Este procedimiento abarcó la exploración de bases de datos especializadas, el escrutinio de artículos académicos, el análisis detallado de investigaciones previas, la revisión exhaustiva de publicaciones sobre el tema, la indagación de normativas nacionales e internacionales que regulan este tipo de material, la participación en ponencias, el estudio de material audiovisual, consultas con expertos y cualquier otro medio del cual se pudiera extraer información relacionada con el estudio.

### **3.2 SELECCIÓN DE MATERIAL DE RCD**

Se identificó y se seleccionó con rigurosidad el material central del estudio, el cual comprende RCD. Este proceso se llevó a cabo considerando la relación entre el análisis de ensayos previsto en el plan de estudio y la calidad del material adquirido con ese propósito.

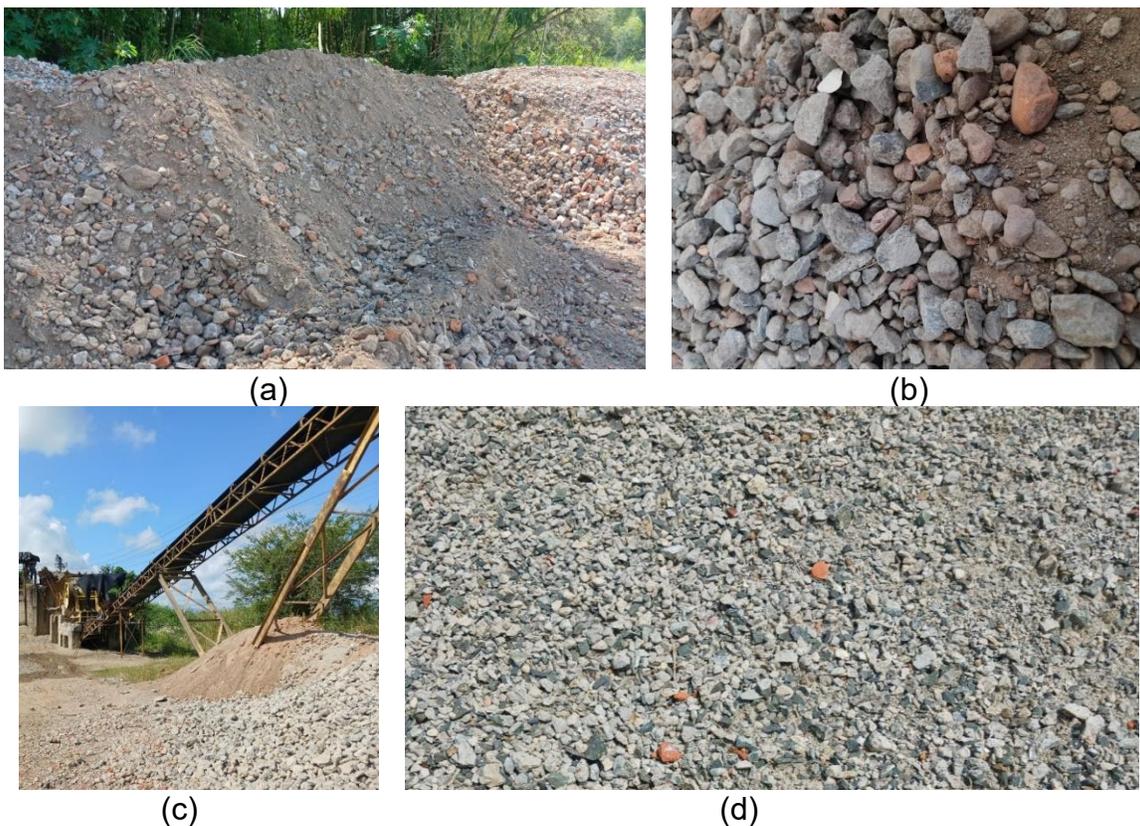
El material de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) se recolectó de la planta de aprovechamiento Álvaro Vásquez ubicada en el municipio de Puerto Tejada, Cauca, donde se acopian RCD procedentes en su mayoría de edificaciones verticales demolidas en la ciudad de Cali por parte de las empresas Jaramillo Mora y Meléndez, especializadas en la construcción y comercialización de este tipo de estructuras, además de ser responsables de la recolección y transporte de los RCD hasta la planta en mención.

En la planta, se sigue un sistemático procedimiento para la correcta transformación y posibilitación del reuso o aprovechamiento de RCD, iniciando con el almacenamiento de los materiales; que puede realizarse de dos maneras, la primera consiste en que si el material viene con una previa selección de acuerdo a sus componentes desde su lugar de origen, este se almacenará junto con los demás materiales de su tipo; si por el contrario, en el material viene un conjunto diverso de componentes, este deberá pasar primero por un proceso de selección en la planta, para separar sus elementos. Posterior a este proceso selectivo, se continua con la transformación del material, lo cual consiste en hacer pasar los residuos de construcción por una planta de trituración con tecnología especializada que reduce el tamaño del material de acuerdo al aprovechamiento que se le pretende dar; una vez el material pasa por esta etapa, se almacena donde se evite su contaminación y se garantice su calidad para finalmente ser usado.

El proceso de adquisición y muestreo del material para transportarlo a los laboratorios de suelos y pavimentos de la Universidad del Cauca, que fue el lugar donde se desarrollaron todas las pruebas de laboratorio, se reguló estrictamente por las recomendaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) relacionadas con cada uno de los ensayos contemplados en el plan. Se garantizó la correcta obtención y representatividad de las muestras, siguiendo los parámetros establecidos por la normativa correspondiente, incluyendo el tratamiento estadístico asociado a cada ensayo.

La Ilustración 8 muestra el material usado en el estudio.

*Ilustración 8. AR usado en estudio: (a) RCD almacenado en planta de tratamiento, (b) RCD, (c) Planta de tratamiento, (d) AR de estudio*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.3 TRANSFORMACIÓN DE RCD EN AR, MEDIANTE TRITURACIÓN**

Una vez sometido el RCD a su proceso de trituración con el objetivo de obtener partículas aptas para el estudio y que guardaran similitud con aquellas comúnmente utilizadas en la pavimentación de carreteras, el RCD pasa de ser un residuo de construcción gracias a su proceso de transformación, para ser nombrado como un agregado reciclado (AR) de valorización.

### **3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

Para evaluar las propiedades de los agregados reciclados empleados en la investigación, se llevaron a cabo una serie de ensayos según lo exigido por la normativa INVIAS para subbases y bases granulares en los artículos 320 y 330 respectivamente, que aunque convirtió este proceso y sometió a los RCD a condiciones más desafiantes, puesto que sus características son un tanto distintas a las de un material granular, esta es la única ley aplicable en el país para aceptar el uso de agregados destinados a las capas granulares de un pavimento; cabe resaltar, que si bien, el IDU en su especificación 511-18 establece las pautas de los agregados reciclados para ser usados en estas condiciones, no es una normativa que regule a nivel nacional; por tanto, la determinación de hacer la evaluación con especificaciones disponibles hasta el momento para tal aplicación. Estas pruebas se desarrollaron en el Laboratorio de Suelos y en el Laboratorio de Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, sede Popayán, en articulación con estudiantes del programa de Geotecnología de la materia nombrada como “Electiva 2” en el mismo lugar, quienes apoyaron en dicho proceso; estos ensayos fueron destinados a entender las características intrínsecas del material, tales como la composición, dureza, durabilidad, limpieza, geometría de las partículas y resistencia del material. Ensayos como el CBR, se adaptaron para verificar el incremento en la rigidez del material usado como una subbase granular, teniendo en cuenta que esta posee mayor cantidad de finos que la base granular; esto se realizó bajo condiciones de saturación con agua, considerando la presencia de material cementante en su composición y la posibilidad de reactivación al entrar en contacto con dicho líquido.

#### **3.4.1 Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 $\mu$ m (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado INV E – 214 – 22**

Se realizó el ensayo de determinación de cantidad de material pasante del tamiz No. 200 de acuerdo a los parámetros especificados en la norma INV E – 214 – 22 para conocer la proporción de arcilla, limos o polvillo presente en los materiales de

AR con tamaños inferiores al mencionado. Este ensayo es crucial para evaluar la finura del material y detectar la posible reactividad de partículas de este tamaño que podrían ser susceptibles de activación cuando entran en contacto con el agua.

Para realizar este procedimiento, se lavó la muestra de agregado utilizando agua pura. Posteriormente, el agua decantada, que contenía materiales suspendidos y disueltos, se filtró a través de un tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200). La pérdida de masa resultante del lavado se determinó como un porcentaje de la masa seca de la muestra original, lo cual corresponde al porcentaje de material que pasa a través del tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200).

En la Ilustración 9 se puede visualizar parte del procedimiento realizado.

*Ilustración 9. Ensayo de determinación de la cantidad de material que pasa a través del tamiz de 75  $\mu\text{m}$*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.4.2 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E – 213 – 22**

La distribución granulométrica de un material es determinante para conocer los tamaños de agregados presentes en una muestra del mismo. En este caso, se llevó a cabo esta prueba de caracterización según lo establecido en la INV E – 213 – 22, con el fin de analizar la heterogeneidad de los tamaños de las partículas del AR y, de este modo, encaminarse al establecimiento de su potencial para ser usado en pavimentación.

La muestra de AR se tamizó dejándolo pasar a través de una serie de tamices de mallas de diversos tamaños, iniciando con el tamiz de apertura más grande en la parte superior y finalizando con el tamiz de apertura más pequeña en la parte inferior. Luego, se registró el peso del material retenido en cada tamiz, así como el peso del material que pasa a través de ellos, para calcular el porcentaje de material retenido y el porcentaje de material que pasa en cada tamaño de abertura.

La Ilustración 10 muestra parte del procedimiento realizado al AR para completar su análisis granulométrico.

*Ilustración 10. Ensayo de análisis granulométrico*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.4.3 Determinación de componentes del AR**

Los materiales de AR son altamente variables en composición, dependiendo de la obra de donde se extraigan, los procesos de demolición utilizados y los métodos de clasificación empleados. A diferencia de los agregados naturales, los AR no guardan una similitud típica entre ellos, lo que subraya la importancia de comprender su composición, ya que estas proporciones determinan sus propiedades y desempeño.

Dado que no existe una norma específica para la clasificación de materiales de AR, se desarrolló una metodología propia para garantizar la representatividad de la muestra. Durante este proceso, se seleccionó una muestra del AR, centrándose en

la fracción gruesa de la granulometría ya clasificada, donde resulta más sencillo identificar las partículas de los diversos materiales que componen el AR, ya que en partículas de tamaño inferior al tamiz No. 4 resultan difíciles de distinguir. Se realizó una inspección visual de la muestra para identificar y separar los materiales presentes, se pesaron las partículas de cada material identificado y se realizaron cálculos en relación con la masa inicial de la muestra. Identificando mediante este enfoque, una estimación precisa de la proporción de cada material presente en el AR, lo que facilitó su manejo y disposición adecuada posteriormente.

En la Ilustración 11 se pueden visualizar los materiales presentes en el AR en estudio.

*Ilustración 11. Determinación de componentes del AR*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### **3.4.4 Densidad, densidad relativa, densidad aparente y absorción del agregado fino INV E – 222 – 22**

La determinación del volumen ocupado por un agregado, así como su capacidad de absorción, constituyen aspectos fundamentales para comprender las propiedades intrínsecas del material. Esta información proporciona conocimientos esenciales para determinar su idoneidad y comportamiento en aplicaciones constructivas, especialmente en proyectos de pavimentación.

En el marco de este estudio, se llevó a cabo el ensayo para medir la densidad del agregado fino de AR a través de lo estipulado en la INV E – 222 – 22. Para ello, se utilizó una muestra de material que pasó a través del tamiz No.4 y fue retenida en el tamiz No.200, con un estado SSS (saturado, superficialmente seco) y un peso de 500 g. Inicialmente, se llenó un matraz con agua hasta un nivel específico. Posteriormente, se procedió a agregar la muestra al matraz y se realizó desaireación mediante el uso de una bomba de vacío. Una vez completado este procedimiento, se llenó el matraz con agua hasta el punto de aforo y se llevó a baño maría a una temperatura determinada. Luego, la muestra se colocó en recipientes y se sometió a secado en el horno. Finalmente, utilizando las masas y el volumen del matraz, se calculó el volumen de la muestra y su densidad.

En la Ilustración 12 se muestra parte del procedimiento realizado en laboratorio para este ensayo de densidad de partículas finas.

*Ilustración 12. Ensayo de gravedad específica de las partículas pasantes del tamiz No.4 y retenido No.200: (a) Material SSS, (b) Medición de gravedad, (c) Pesaje de material con matraz y agua*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.4.5 Densidad, densidad relativa, densidad aparente y absorción del agregado grueso INV E – 223 – 22**

La determinación de la densidad del agregado grueso del material de AR es un aspecto crucial en el proceso de diseño y construcción. Esta magnitud, como medida de la masa por unidad de volumen, al igual que su capacidad de absorción,

ejercen una influencia directa en la capacidad de carga, estabilidad, calidad, rendimiento y resistencia del material.

Para llevar a cabo esta prueba, se siguió un procedimiento específico tal como se describe en la norma INV E – 223 – 22, que consistió en sumergir inicialmente una muestra del agregado en agua para saturar sus poros durante un periodo de 24 horas; posteriormente, se retiró el agua y se registró la masa de la muestra saturada; luego, se determinó su volumen mediante el método de desplazamiento de agua y finalmente, la muestra se secó en un horno para calcular su masa seca. Cabe mencionar que para este ensayo se realizó la medición a partir de la fracción del material pasante del tamiz de 2" y retenido en el tamiz No.4, teniendo en cuenta su representatividad para los demás análisis de la investigación.

La Ilustración 13 muestra el procedimiento realizado para esta prueba.

*Ilustración 13. Ensayo de gravedad específica de las partículas pasantes del tamiz  $\frac{3}{4}$ " y retenido No.4: (a) Pesaje de muestra saturada, (b) Determinación de volumen, (c) Método de desplazamiento de agua*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

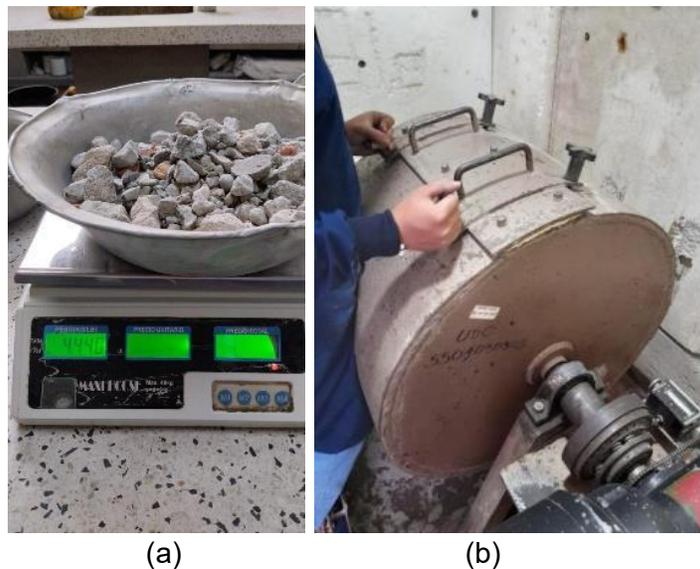
### 3.4.6 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles INV E – 218 – 22

Investigar la resistencia de los agregados gruesos del material frente a la abrasión y la degradación mecánica, mediante la reproducción de condiciones realistas de desgaste durante su manipulación, construcción y uso, proporciona una evaluación del comportamiento del material en situaciones críticas, además de permitir una estimación precisa de su dureza.

Para realizar este ensayo, se introdujo una muestra de agregado en un tambor giratorio, junto con una carga abrasiva de bolas de acero. El tambor se puso en movimiento a dos velocidades diferentes hasta generar 100 revoluciones y 500 revoluciones al material, durante un tiempo específico. Luego, se registró la pérdida de peso del agregado a cada una de estas velocidades, como consecuencia de la abrasión causada por la compresión, el impacto y la fricción con las bolas de acero. Todo este proceso bajo lo recomendado en la INV E – 218 – 22.

La Ilustración 14 expone parte del procedimiento empleado para determinar el valor de desgaste del material en la máquina de los Ángeles.

*Ilustración 14. Ensayo en máquina de los Ángeles: (a) Pesaje de muestra, (b) Máquina de los Ángeles*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

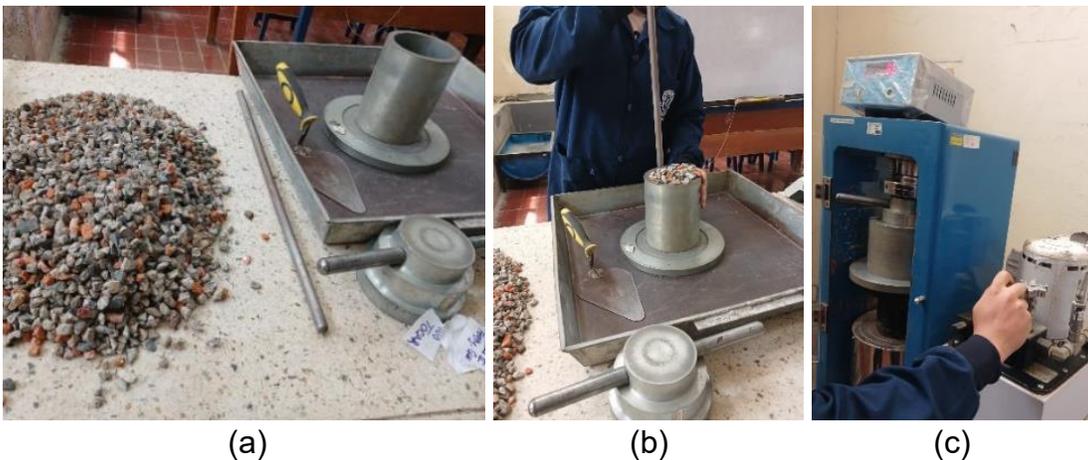
### 3.4.7 Determinación del valor del 10% de finos INV E – 224 – 22

Evaluar la resistencia mecánica de un agregado grueso ante condiciones de trituración generadas por compresión, las cuales le llegan a producir un 10% de partículas finas pasantes del tamiz #8, permite conocer los esfuerzos que llega a soportar el material, y su capacidad de transmitir cargas sin desintegrarse, demostrando así su resistencia ante fenómenos ejercidos por el tránsito y predecir su comportamiento.

Para ejecutar este ensayo se siguió lo estipulado en la INV E – 224 – 22; se obtuvo una muestra del material pasante del tamiz de 1/2" y retenido en el de abertura de 3/8" seco; esta muestra se vertió en un cilindro y se compactó en tres capas. Luego, se pesó el conjunto, se colocó en la máquina de compresión y se aplicó una carga constante durante un período de 10 minutos. Posteriormente, se midió la penetración del pisón y se registró la carga aplicada. Después de liberar la carga, la muestra se tamizó usando un tamiz N°8, y se pesó el material retenido para compararlo con el peso total de la muestra original. Este proceso se repitió con varias cargas de compresión con el objetivo de determinar la carga a la cual se produce un 10% de finos en el agregado.

En la Ilustración 15 se muestra el proceso ejecutado en el ensayo.

*Ilustración 15. Ensayo de determinación de 10% de finos: (a) Equipo de ensayo, (b) Compactación de muestra, (c) Aplicación de carga*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### 3.4.8 Solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio INV E – 220 – 22

Evaluar la resistencia de los agregados utilizados en pavimentación frente a las variaciones climáticas es fundamental para garantizar la durabilidad de las estructuras viales. Este estudio tiene como objetivo principal medir la solidez de los agregados mediante la simulación de cambios por agentes atmosféricos, que pueden afectar su estructura y rendimiento en el tiempo. Durante la simulación, se reproducen fenómenos como la rehidratación y el secado repetidos, imitando las condiciones ambientales cambiantes. La rehidratación del agregado, al entrar en contacto repetidamente con una solución, causa una expansión interna similar al proceso de congelamiento, mientras que el secado libera el agua retenida dentro de las partículas, lo que puede ocasionar fracturas y deterioro del material.

Para llevar a cabo este ensayo, se preparó una solución saturada de sulfato de magnesio. Posteriormente, se sumergieron las muestras en esta solución durante un periodo de inmersión de 17 +/- 1 hora, permitiendo que la solución penetrara en las partículas a través de poros permeables. Luego, el conjunto se sometió a un proceso de secado en horno hasta alcanzar una masa constante, lo que define un ciclo del ensayo. El procedimiento consistió en la realización de cinco ciclos, lo que permitió evaluar la resistencia de los agregados frente a la acción del sulfato de magnesio. Esta prueba se siguió de acuerdo a las instrucciones de la INV E – 220 – 22.

En la Ilustración 16 se muestra parte del proceso realizado para evaluar la durabilidad de los agregados de AR.

*Ilustración 16. Ensayo de solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio: (a) Muestra en solución de sulfato de magnesio, (b) Muestra después de secado en horno con sulfato de magnesio*



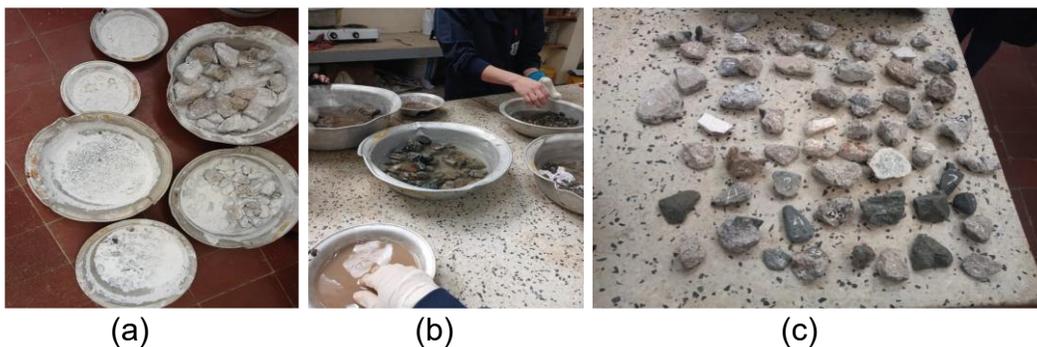
Fuente: Elaboración propia de la autora.

### 3.4.9 Solidez de los agregados (sin ladrillo) frente a la acción de solución de sulfato de magnesio INV E – 220 – 22

Dado que durante el ensayo de solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio se observó un comportamiento atípico atribuible a la presencia de componentes de ladrillo, se decidió realizar el ensayo por una segunda vez, suprimiendo este elemento de la composición de la fracción gruesa del material de AR donde es más práctica su eliminación, con la intención de verificar el nuevo desempeño del material para así extraer mayor conocimiento sobre este. El proceso se llevó a cabo de manera similar al descrito en el numeral 3.4.8, pero excluyendo dicho componente.

La Ilustración 17 muestra parte de la prueba ejecutada.

*Ilustración 17. Ensayo de solidez de los agregados (sin ladrillo) frente a la acción de solución de sulfato de magnesio: (a) Muestra luego de proceso de secado en horno, (b) Lavado de muestra en Cloruro de Bario, (c) Examen cualitativo*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### 3.4.10 Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 22

Conocer el contenido de humedad que hace que la fracción fina del material cambie de consistencia líquida a plástica es un parámetro importante, dado que muchos de los desempeños de un suelo como su compresibilidad, permeabilidad, compactabilidad, cambios de tamaño y resistencia al corte tienen relación con esta característica, además de permitir su clasificación dentro de los distintos tipos de suelos; en el caso de los RCD conocer el valor de este parámetro determinará su tendencia a cambios en presencia de agua, que es uno de los aspectos de enfoque en este estudio.

El ensayo se llevó a cabo siguiendo las directrices establecidas en la norma INV E – 125 – 22. Primero, se preparó una pasta combinando la muestra de suelo con agua, la cual se dejó curar durante 16 horas para asegurar su estabilización. Luego, esta pasta se colocó en la copa de Casagrande y se sometió a un patrón de golpes estandarizados levantando y dejando caer la copa. Después, se ajustó el contenido de humedad y se repitió este procedimiento hasta que el surco formado por la copa de Casagrande se cerró en una longitud específica. En ese momento, se registró el contenido de humedad correspondiente al límite líquido del suelo.

En la Ilustración 18 se muestra el procedimiento ejecutado en esta prueba.

*Ilustración 18. Ensayo de determinación del límite líquido de los suelos*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### **3.4.11 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E – 126 – 22**

Se realizó un proceso estandarizado para determinar el límite plástico e índice de plasticidad de los finos presentes en el RCD según la INV E – 126 – 22, para determinar su contenido de agua, expresado en porcentaje del peso seco, cuando se encuentra en el límite entre los estados plástico y semisólido, además de establecer los rangos de contenido de agua donde este se comporta plásticamente.

Este proceso implicó la formación de una pasta con la muestra de suelo y agua, seguido de un análisis para identificar el punto en el cual la pasta comienza a

agrietarse, marcando el límite plástico. Posteriormente, se calculó el índice de plasticidad expresado como la resta del valor del límite plástico al límite líquido.

En la Ilustración 19 figura parte del procedimiento realizado al material.

*Ilustración 19. Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad*



Fuente: Elaboración propia del autor.

#### **3.4.12 Equivalente de arena de suelos y agregados finos INV E – 133 – 22**

Tener conocimiento sobre la cantidad de arena presente en la fracción fina del agregado de RCD siguiendo las recomendaciones de la INV E – 133 – 22, permite evaluar la limpieza del material, pues un valor alto de este parámetro indica las buenas condiciones del mismo, para evitar problemas de acumulación de agua, dificultades en la compactación o degradación debido a la presencia de polvo y finos arcillosos o plásticos indeseables en el agregado.

Para llevar a cabo este ensayo, se preparó previamente una solución de stock que incluía  $\text{CaCl}_2$ , glicerina, formol y agua. Esta solución se diluyó con agua para obtener la solución de trabajo requerida. Luego, se extrajo una muestra del material pasante por el tamiz N°4 y se colocó en probetas junto con la solución de trabajo. A continuación, se sometió la mezcla a procesos de agitación y reposo durante tiempos específicos. Finalmente, se determinaron las lecturas correspondientes de arcilla y arena mediante procedimientos estandarizados.

En la Ilustración 20 se muestra el proceso realizado en esta prueba.

*Ilustración 20. Ensayo de determinación de equivalente de arena: (a) Vaciado de material en probeta, (b) Muestra en reposo*



(a) (b)  
Fuente: Elaboración propia de la autora.

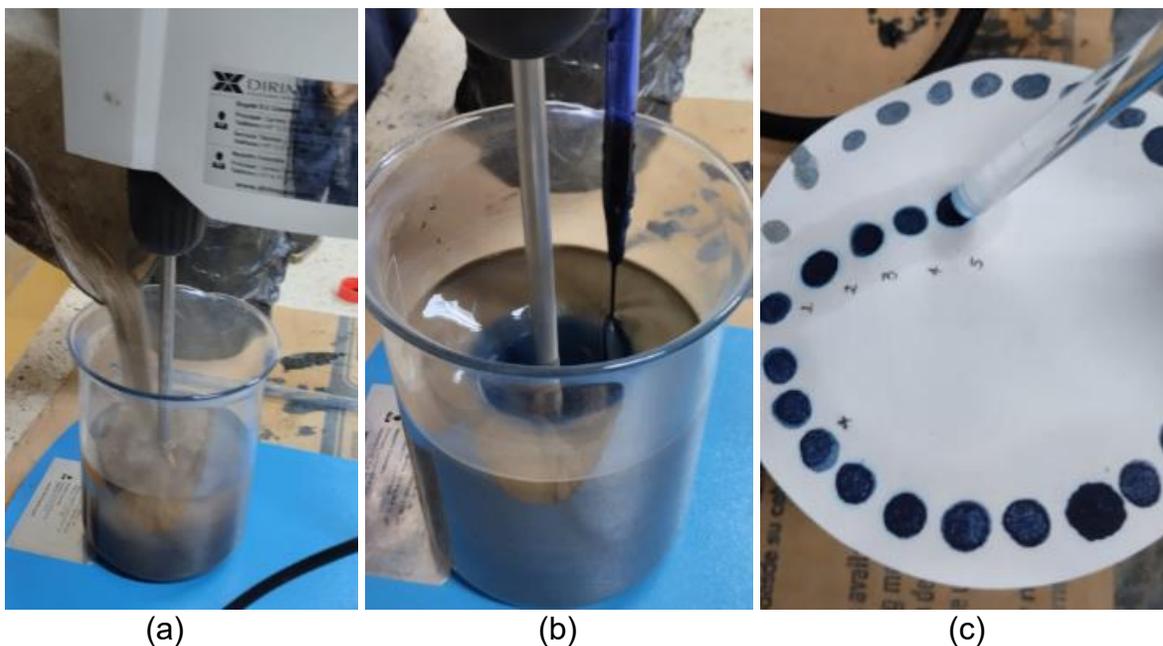
### **3.4.13 Valor de azul de metileno en agregados finos INV E – 235 – 22**

Este ensayo es fundamental para identificar la presencia de arcilla nociva en el agregado y estimar su concentración. Es esencial en el estudio para prevenir o detectar la necesidad de un tratamiento que reduzca o elimine estas partículas del agregado reciclado, asegurando así un rendimiento óptimo.

La prueba se ejecutó de acuerdo a las directrices establecidas en la norma INV E – 235 – 22. El procedimiento incluyó el uso de 200 g de material que pasó a través del tamiz No.4; se agregaron cantidades incrementales de solución de azul de metileno durante un minuto, seguido de una prueba en la que se tomó una gota de la muestra y se colocó sobre papel filtro hasta que se observó la presencia de colorante libre, lo que indica un resultado positivo o la cantidad de materia orgánica medida a través del consumo de azul de metileno hasta ese punto. Posteriormente, se realizó la prueba de contundencia para determinar la cantidad de solución absorbida por la muestra.

La Ilustración 21 muestra el proceso del ensayo realizado.

*Ilustración 21. Ensayo de azul de Metileno: (a) Vaciado de material para ensayo, (b) Adición de azul de metileno, (c) Medición de consumo de azul de metileno*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### **3.4.14 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados INV E – 211 – 22**

Determinar de manera precisa el contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable en agregados pétreos permite conocer la cantidad de material susceptible a desintegrarse en presencia de agua, que en caso de estar presente en cantidades no admitidas puede derivarse en la pérdida de resistencia y durabilidad del pavimento.

Este ensayo se realizó con una muestra de material, la cual se sumergió en agua durante 24 horas, seguido a esto, con la yema de los dedos, entre el pulgar y el índice, se apretaron las partículas para tratar de romperlas en tamaños más pequeños; luego se tamizó en húmedo para llevar a secado en horno. Las partículas que se desintegraron se consideraron terrones de arcilla o partículas deleznable y su porcentaje se calculó como la relación entre su masa y la masa original de la muestra. Todo esto de acuerdo a los lineamientos establecidos en la INV E – 211 – 22.

En la Ilustración 22 se expone parte del proceso realizado.

*Ilustración 22. Ensayo de partículas deleznable: (a) Saturación de material, (b) Partículas deleznable, (c) Tamizado de material*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.4.15 Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras INV E – 230 – 22**

La consideración de los índices de aplanamiento y alargamiento de las partículas constituyentes de un agregado es fundamental, ya que los materiales con formas que estén en esta concordancia tienden a ocasionar complicaciones durante el proceso constructivo. Partículas planas y alargadas tienen una mayor tendencia a fracturarse y desintegrarse durante la compactación, lo que altera la distribución granulométrica del agregado y repercute negativamente en su comportamiento y rendimiento en aplicaciones constructivas.

Durante el ensayo, que se basó de acuerdo a lo expuesto en la INV E – 230 – 22, se procedió a medir la longitud, ancho y espesor de las partículas de una muestra representativa del material. Estas mediciones se realizaron utilizando un calibrador de aplanamiento y otro de longitudes, con el fin de calcular tanto el índice de aplanamiento como el índice de alargamiento a partir de dichas mediciones.

En la Ilustración 23 y en la Ilustración 24 se muestra la medición del índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados del AR respectivamente.

*Ilustración 23. Ensayo de determinación de índice de aplanamiento.*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Ilustración 24. Ensayo de determinación de índice de alargamiento.*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### 3.4.16 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E – 227 – 22

Por medio del ensayo de porcentaje de partículas con superficie angulosa, áspera o quebrada formada por trituración, por medios artificiales o de manera natural en agregados pétreos, se determina la cantidad de partículas con una o más caras fracturadas, dado que la nulidad de estas características pueden llegar a afectar la calidad del material de manera indeseada para la construcción de obras viales, pues esta particularidad interviene en la resistencia al corte, el incremento de la fricción o la estabilidad.

La prueba se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la INV E – 227 – 22 con una muestra de material seco y tamizado, la cual se inspeccionó visualmente para identificar las partículas fracturadas. Luego, se calculó el porcentaje de estas partículas como la relación entre su masa o conteo y la masa o conteo total de la muestra.

La Ilustración 25 representa visualmente el procedimiento ejecutado.

*Ilustración 25. Ensayo de determinación de caras fracturadas: (a) Equipo de ensayo, (b) Cara fracturadas*



(a)

(b)

Fuente: Elaboración propia de la autora.

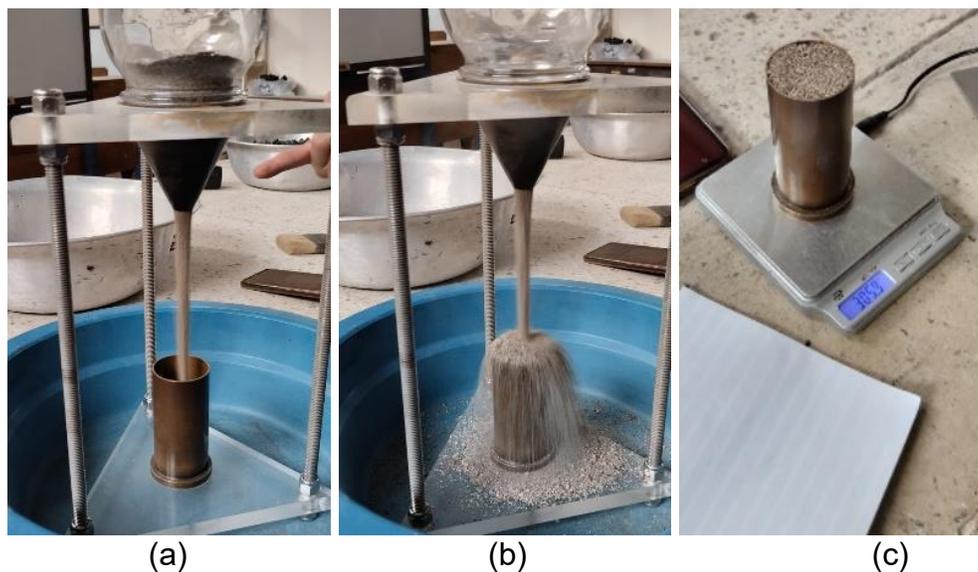
### 3.4.17 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (Angularidad de la fracción fina) INV E – 239 – 22

Este ensayo ofrece datos importantes acerca de la cantidad de espacio de aire entre las partículas del agregado fino, considerando la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría. Este conocimiento es fundamental, ya que la cantidad de vacíos influye directamente en la resistencia, durabilidad, estabilidad, drenaje, compactación y deformabilidad del material.

Para llevar a cabo este análisis, se utilizó el Método de prueba A – Muestra gradada estándar, que se expone en la INV E – 239 – 13. Se extrajo una muestra representativa del agregado fino y se dejó caer desde una altura específica hasta llenar un recipiente cilíndrico de volumen conocido. Posteriormente, se retiró el material del recipiente, se determinó su peso, y teniendo en cuenta la gravedad de este para conocer su volumen, se calculó la cantidad de vacíos presentes en él.

En la Ilustración 26 se muestra el proceso realizado en laboratorio para conocer el contenido de vacíos del agregado fino del material de AR.

*Ilustración 26. Ensayo de determinación del contenido de vacíos: (a) Muestra cayendo, (b) Recipiente lleno, (c) Pesaje de muestra*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### 3.4.18 Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 22

La importancia de una adecuada compactación de un suelo radica en su resistencia al corte, su compresibilidad o su permeabilidad, en ese sentido, para obtener una capacidad adecuada del mismo que genere estos factores ubicándolos dentro de un rango admisible y desarrolle en el unas condiciones adecuadas de estabilidad y durabilidad, se realiza el ensayo de proctor modificado, el cual permite determinar la humedad y el grado de compactación al cual el suelo alcanzará distintas densidades y así establecer si estas cumplen con lo requerido en la aplicabilidad que se le pretenda dar.

Para este ensayo, se compactó una muestra de suelo en un molde estándar a diferentes niveles de humedad. La muestra se compactó utilizando una cantidad específica de golpes de un martillo normalizado, en capas uniformes; después de cada compactación, se pesó la muestra y se registró su contenido de humedad. Este proceso se repitió para una serie de niveles de humedad hasta obtener una curva de compactación que muestra la relación entre el contenido de humedad y el peso unitario seco del suelo. Para su realización se siguió el procedimiento estipulado en la INV E – 142 – 13 y parte de ese proceso se muestra en la Ilustración 27.

*Ilustración 27. Ensayo modificado de compactación: (a) Compactación de material, (b) Enrase de muestra en el molde*



(a)

(b)

Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.4.19 CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV E – 148 – 22**

El ensayo de CBR corresponde a la medición del esfuerzo necesario para producir una deformación de 0,1" o 0,2" en el suelo, cuando este se encuentra con su densidad máxima. Su importancia radica en que, si el suelo presenta una alta resistencia, se deberá aplicar un mayor esfuerzo, por tanto, el material demostrará condiciones adecuadas de resistencia, teniendo en cuenta que esta observación se debe hacer en relación a las características de un suelo que presenta condiciones ideales ante esta medición; por otro lado, si el suelo presenta una resistencia baja, el esfuerzo que se deberá aplicar será menor dadas sus condiciones de fragilidad.

Para la ejecución de este ensayo se siguieron los lineamientos establecidos en la INV E – 148 – 22; se cuarteó una muestra de material granular, se tamizó y se reemplazaron los sobre tamaños; posteriormente se separó la muestra y se calculó la cantidad de agua a añadir para que el material alcanzara su densidad máxima al ser compactado. Se compactó la muestra en moldes con diferentes energías de compactación (10, 25 y 56 golpes) y se tomó testigo de humedad, luego, se pesó cada molde más la muestra, se colocó un trípode de lectura de expansión chequeando que el vástago de medición se encontrara en cero, para inmediatamente llevar a curado en cámara húmeda durante un día, considerando que la INV-148 indica que se admite un periodo de inmersión más corto a 4 días, nunca menor a 24 horas, si se tratan de suelos granulares que se saturan rápidamente. Finalmente, se realizó la penetración para medir el esfuerzo necesario para generar en las probetas compactadas distintas deformaciones, correspondientes a 0,1", 0,2", 0,4" y 0,5", estas dos últimas mediciones tomadas como una herramienta de comparación, pues aunque el ensayo de CBR no es usado para materiales cementantes, se considera que el reporte de resistencia ante estos valores simula un partimiento del material en su superficie y asemeja a la forma como realmente trabajan estos materiales ante condiciones realistas. La Ilustración 28 muestra parte de la ejecución del ensayo.

*Ilustración 28. Ensayo CBR para AR: (a) Humedad óptima, (b) Compactación de muestra, (c) Inmersión del material*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### **3.4.20 CBR modificado a 4 y 28 días de curado para AR usado como una subbase granular**

Se ejecutó un ensayo de CBR realizando una modificación en su periodo de curado, el cual pasó de ubicarse en un día, considerando el mínimo lapso de tiempo que exige la normativa INVIAS para materiales granulares de saturación acelerada, a ubicarse en un periodo de 4 y 28 días respectivamente, con el objetivo de evaluar el incremento de la resistencia de los AR usados como subbase granular al estar en condiciones húmedas durante un rango de tiempo prologando o mayor al que habitualmente se emplea en este tipo de ensayos, para evaluar si la porción de finos con alta probabilidad de contenido de materiales puzolánicos de las diferentes fases minerales que lo componen, aumentaban la resistencia del agregado al generar reacciones hidráulicas en su interior, dadas sus propiedades aglutinantes.

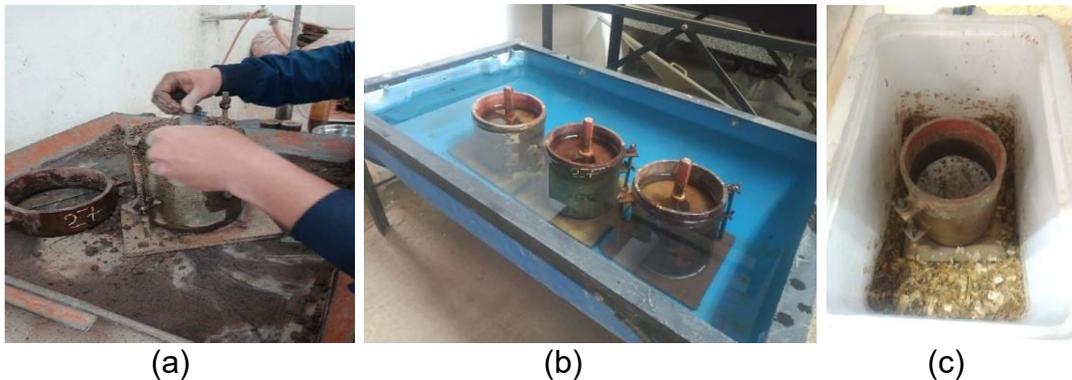
Para la realización de esta prueba fue necesario primeramente ubicar la granulometría del material de AR para ser usada como una subbase granular-50 que es la que más se ajustó para este tipo de material, de acuerdo a las proporciones de los distintos tamaños de las partículas que se encuentran en su composición y que se consideró dada su mayor cantidad de finos con probabilidades de generar las reacciones ya mencionadas; posterior a este proceso se hizo el ensayo de Proctor Modificado para establecer las relaciones de humedad-peso unitario para el AR; finalmente, se realizó el ensayo de CBR para evaluar la resistencia del material a 4 y 28 días y se hicieron comparaciones, también con

respecto a lo ocurrido a 0,1", 0,2", 0,4 y 0,5" como lo expuesto en la metodología del ensayo de CBR para el AR en general.

Es crucial considerar que el ensayo CBR involucra la comparación entre una muestra de suelo y una muestra patrón libre de cemento; un aspecto divergente respecto a esta investigación. No obstante, el propósito principal de este ensayo fue evaluar cómo la presencia de material cementicio afecta la resistencia a la penetración y por ende la rigidez, que es el parámetro medido mediante el ensayo CBR.

La Ilustración 29 muestra parte del proceso realizado.

*Ilustración 29. Ensayo CBR a 4 y 28 días de curado: (a) Enrase de muestra en molde, (b) Inmersión de muestras, (c) Muestra en ambiente húmedo*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE PAVIMENTOS CON DIFERENTES COMPOSICIONES DE MATERIALES EN SU ESTRUCTURA**

Se ejecutó un análisis estructural comparativo de 4 tipos de pavimentos con diversas composiciones estructurales, incorporando en ellas AR de manera variada. El objetivo fue contrastar las deformaciones por ahuellamiento y fatiga resultantes de cada una de estas configuraciones con las de un pavimento estándar compuesto por materiales convencionales, y a su vez chequear el cumplimiento con las condiciones establecidas de admisión, para determinar cuál opción resulta más viable en términos de deformaciones similares a las de una estructura compuesta por material granular empleado típicamente en este ámbito y de buen

comportamiento, mediante la utilización del Software WESLEA, cuyo funcionamiento fue previamente explicado.

La evaluación del comportamiento estructural implicó la creación de pavimentos con un diseño que causara deformaciones similares entre sí, pero con distintas configuraciones empleadas dadas las características distintivas de los materiales, realizando un número considerable de iteraciones hasta concluir la configuración óptima que permitiera alcanzar un buen desempeño de cada una de las estructuras viales. El primero se realizó con el uso de materiales convencionales en toda la estructura; un segundo pavimento se formó con una variación en la base granular, la cual estuvo conformada por la combinación de AR con material de aporte; la configuración del tercer pavimento comprendió una variación respecto al primer diseño en la capa de la subbase granular, que estuvo compuesta por la combinación de AR con material de aporte; y la estructura del cuarto pavimento comprendió una variación en las capas de la base y subbase conjuntamente, que se conformaron por la combinación de AR con material de aporte. Posteriormente, se definió la capacidad estructural de cada configuración de acuerdo a los resultados de las deformaciones sufridas por efectos de fatiga y ahuellamiento, considerando factores como el tránsito, tipo de suelo, módulos resilientes, módulos elásticos, relaciones de Poisson, espesores, entre otros, empleando valores con relaciones similares a las que se pueden presentar en el departamento del Cauca, y más específicamente en la ciudad de Popayán, donde se pretende ser precursores en este estudio y aplicabilidad, además de contar con cifras reales para tal caso.

Seguidamente, se hizo la verificación del cumplimiento de las deformaciones resultantes por fatiga sufridas en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y de las deformaciones por ahuellamiento generadas en la fibra superior de la subrasante, con las deformaciones admisibles para tales casos según lo recomendado por la Shell para esta medición, donde se hizo uso de la Ecuación 1 y de la Ecuación 2:

*Ecuación 1. Deformación unitaria de tracción en la carpeta asfáltica*

$$E_t = (0.856 * V_b + 1.08) * E_1^{-0.36} * \left(\frac{N_{8.2}}{K}\right)^{-0.2}$$

Donde:

$E_t$  = Deformación unitaria de tracción en la carpeta asfáltica

$V_b$  = Volumen de asfalto en la mezcla (%)

$E_1$  = Módulo dinámico de la mezcla (N/m<sup>2</sup>)

$N_{8.2}$  = Número acumulado de ejes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño

$K$  = Coeficiente de Calage, que relaciona las condiciones de laboratorio a las condiciones reales del material. ( $K = K_1 * K_2 * K_3$ )

*Tabla 3. Coeficientes de Calage*

Auto reparación de pequeñas fisuras diferentes estados de tensiones	K1	Mezclas abiertas % bajo de asfalto	Mezclas densas ricas en asfalto
		2	10
Distribución lateral de las cargas	K2	Cualquiera = 2.5	
Diferentes temperaturas de trabajo de la mezcla a lo largo del día y del año	K3	Espesores pequeños Temperaturas bajas	Espesores altos Temperaturas altas
		1	0.33

Fuente: Tomado de: (SHELL International Petroleum Company Shell Pavement, 1978).

*Ecuación 2. Deformación unitaria de compresión en la subrasante*

$$E_z = 2.1 * 10^{-2} * N^{-0.25}$$

Donde:

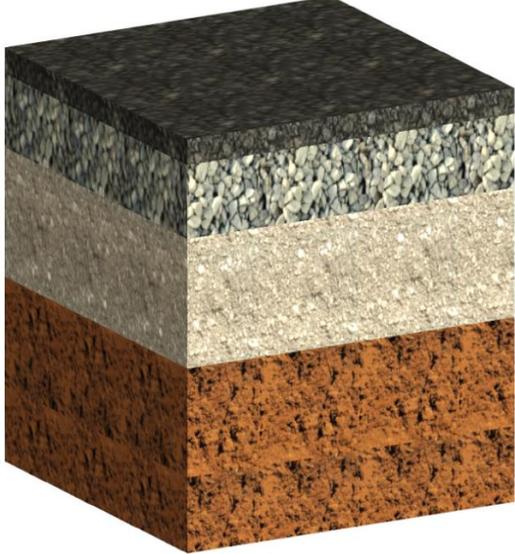
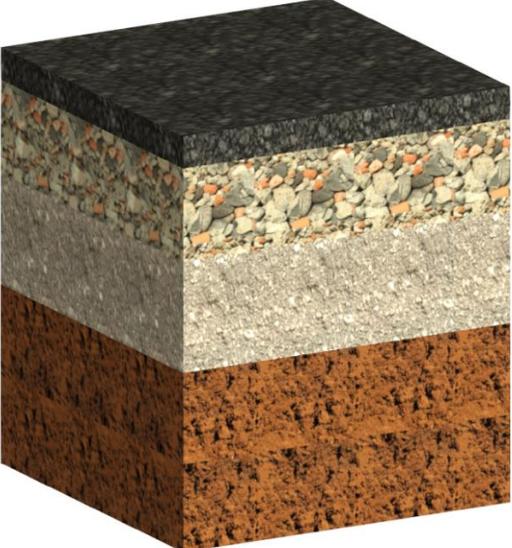
$E_z$  = Deformación unitaria de compresión en la subrasante

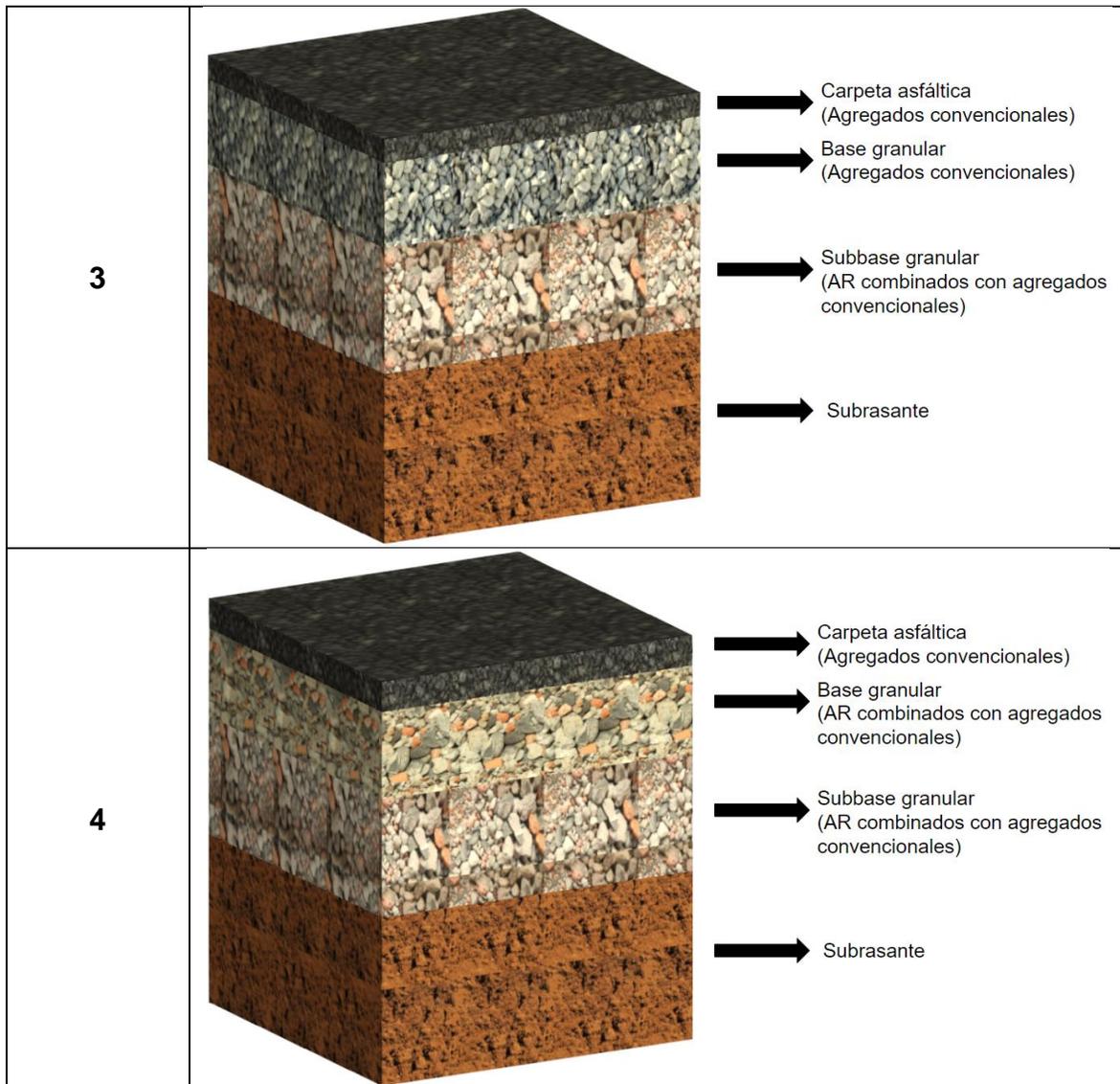
$N$  = Tránsito equivalente

Luego de esta recopilación y procesamiento de información, se determinó cuales composiciones demuestran mejor comportamiento estructural o están en concordancia con las de un pavimento de estructura estándar.

La Tabla 4, muestra los 4 modelos de pavimentos elaborados para evaluar su comportamiento estructural y posteriormente se hace la descripción de cada una de las composiciones, así como los valores de los parámetros asociados a la medición de su desempeño.

Tabla 4. Configuraciones de pavimentos para evaluar el comportamiento estructural

Estructura de pavimento	Configuración
1	 <p>Diagram illustrating the configuration of pavement structure 1. The structure consists of four layers, from top to bottom:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Carpeta asfáltica (Agregados convencionales)</li> <li>Base granular (Agregados convencionales)</li> <li>Subbase granular (Agregados convencionales)</li> <li>Subrasante</li> </ul>
2	 <p>Diagram illustrating the configuration of pavement structure 2. The structure consists of four layers, from top to bottom:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Carpeta asfáltica (Agregados convencionales)</li> <li>Base granular (AR combinados con agregados convencionales)</li> <li>Subbase granular (Agregados convencionales)</li> <li>Subrasante</li> </ul>

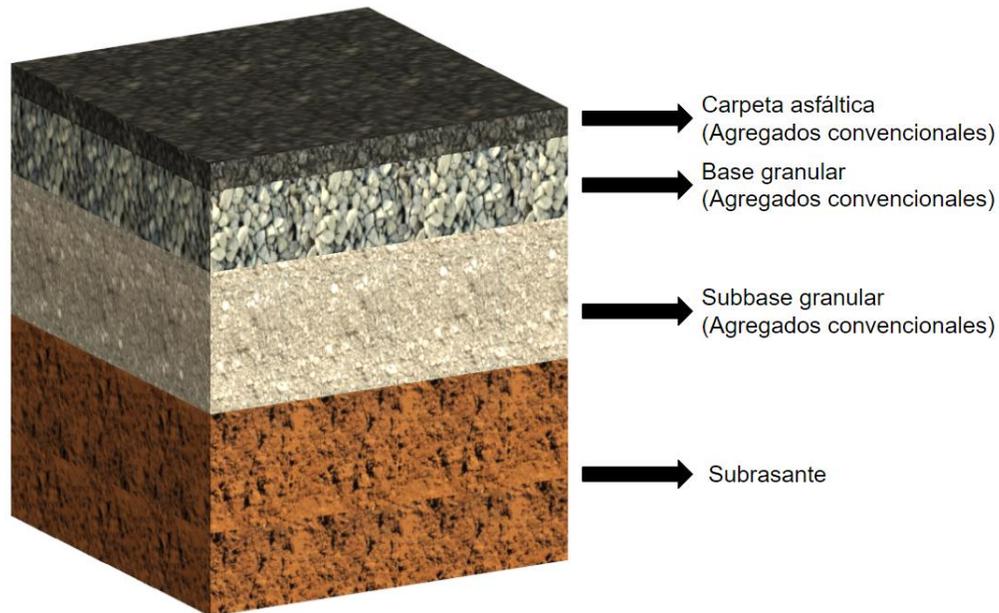


Fuente: Elaboración propia de la autora.

### 3.5.1 Materiales convencionales en toda la estructura

La totalidad de la estructura del pavimento, incluyendo la subrasante, la subbase granular, base granular y carpeta asfáltica, se conformó con agregados naturales convencionales como se expone en la Ilustración 30. Esto proporcionó puntos de referencia para la comparación de los comportamientos.

Ilustración 30. Materiales empleados en la estructura de pavimento 1



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Los parámetros necesarios que se definieron para esta estructura de pavimento, así como los recursos usados para obtener algunos de ellos en casos específicos, y que se introdujeron en el software Weslea con el fin de obtener las deformaciones de fatiga y ahuellamiento sufridas por la estructura vial, se muestran a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos para diseño de pavimento 1

Parámetro	Valor
Tránsito	Medio (2.750.000 de ejes equivalentes)
Eje de diseño	Equivalente (8,2 ton)
Módulo resiliente Subrasante	35 MPa
Módulo resiliente de Subbase Granular	Definido por fórmulas de la Shell
Módulo resiliente de Base Granular	Definido por fórmulas de la Shell
Módulo dinámico de Carpeta Asfáltica	2.600 MPa
Relación de Poisson Subrasante	0,5
Relación de Poisson Subbase Granular	0,45
Relación de Poisson Base Granular	0,4
Relación de Poisson Carpeta Asfáltica	0,35
Espesor Carpeta Asfáltica	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura

Espesor Base Granular	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura
Espesor Subbase Granular	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura

Fuente: Elaboración propia de la autora.

El tránsito se definió como un tránsito medio, correspondiente a la mitad del promedio de este tipo, establecido en 2.750.000 de ejes equivalentes, según consultas con expertos en estudios realizados en la zona.

El eje de diseño usado para este procedimiento fue el equivalente, correspondiente a 8,2 ton, dadas sus condiciones estandarizadas y las intenciones de asemejar el diseño a circunstancias lo más reales posibles, pues este parámetro se hizo necesario para definir la distribución de cargas en la estructura vial.

El módulo resiliente definido para la subrasante con un valor de 35 MPa se estableció así, dado que es el mínimo valor que exige la norma INVIAS para esta capa, además es un valor típico para los suelos que se encuentran en el municipio de Popayán.

En cuanto al módulo resiliente correspondiente a la subbase granular, este fue definido mediante la fórmula establecida por la Shell para calcular tal parámetro, la cual se expone a continuación en la Ecuación 3 y donde se tiene en cuenta el espesor de la capa en estudio y el módulo resiliente de la capa que se encuentra en la posición inferior a esta. El valor definido para este parámetro queda estipulado en el ítem 4.2 correspondiente a resultados, pues fue posible establecerlo una vez se definieron los valores de espesor correspondientes a cada una de las capas de la estructura del pavimento.

*Ecuación 3. Módulo resiliente para subbase granular en pavimento 1*

$$Mr_{SBG} = 0.206 * h_{SBG}^{0.45} * Mr_{SRT}$$

Donde:

$Mr_{SBG}$  = Módulo resiliente para subbase granular

$(h_{SBG})$  = Espesor de la capa de subbase granular  
 $(Mr_{SRT})$  = Módulo resiliente de la subrasante

El módulo resiliente de la base granular para este modelo se definió según los lineamientos establecidos por la Shell, de manera similar a lo realizado con la subbase granular, mediante la implementación de la fórmula que se expone a continuación en la Ecuación 4, donde se tiene en cuenta el espesor de la capa en estudio y el módulo resiliente de la capa que se encuentra en la posición inferior a esta. El valor establecido para este parámetro está detallado en el ítem 4.2, que trata sobre los resultados, este valor se determinó después de definir los espesores de cada capa en la estructura del pavimento.

*Ecuación 4. Módulo resiliente para base granular en pavimento 1*

$$Mr_{BG} = 0.206 * h_{BG}^{0.45} * Mr_{SBG}$$

Donde:

$Mr_{BG}$  =Módulo resiliente base granular  
 $(h_{BG})$  = Espesor de la capa de base granular  
 $(Mr_{SBG})$  = Módulo resiliente de la subbase granular

El módulo dinámico destinado a medir la resistencia de la carpeta asfáltica en el campo plástico ante condiciones del tráfico vehicular, se designó como 2.600 MPa considerando un valor típico para mezclas asfálticas elaboradas en la zona, según consultas con especialista en el caso y lo establecido como valores típicos para este caso según recomendaciones de Witczack.

Relacionado con los datos usados para las relaciones de Poisson que establecen la deformación lateral respecto a la longitudinal de un material al ser sometido a una carga, estas se definieron con valores de 0,5, 0,45, 0,4, y 0,35 para la subrasante, la subbase granular, la base granular y la carpeta asfáltica respectivamente, de acuerdo a valores típicos para cada capa.

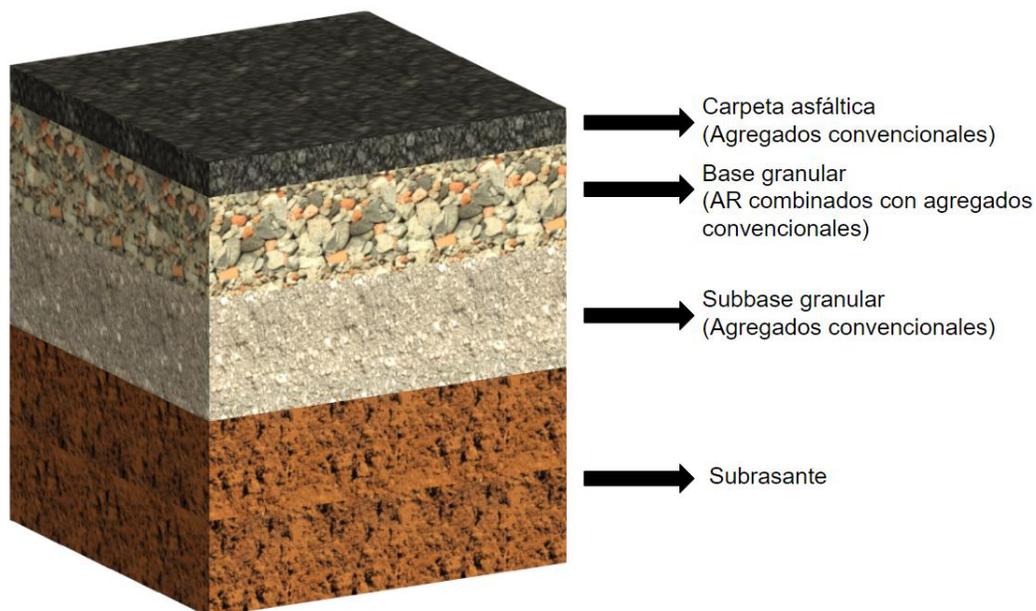
En cuanto a los espesores definidos en esta estructura de pavimento flexible, considerada con mejor comportamiento por su composición con agregados naturales y a la cual se deben asemejar las demás deformaciones obtenidas en el estudio, se establecieron siguiendo un proceso de prediseño. Estos espesores

fueron determinados con el objetivo de garantizar que las deformaciones máximas permitidas se cumplan tanto en la capa inferior de la carpeta asfáltica como en la capa superior de la subrasante, procurando así una uniformidad en las deformaciones observadas durante el estudio.

### 3.5.2 AR combinado con material de aporte en la base granular

La estructura del pavimento se compuso de agregados naturales en su subrasante, subbase granular y carpeta asfáltica, excepto la base granular, que estuvo formada por AR combinado con material granular natural de aporte. Esta configuración se puede visualizar en la Ilustración 31.

*Ilustración 31. Materiales empleados en la estructura de pavimento 2*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Los parámetros que se estipularon para esta estructura de pavimento, así como los recursos usados para obtener algunos de ellos en casos específicos, y que se introdujeron en el software Weslea para obtener las deformaciones de fatiga y ahuellamiento sufridas por el pavimento, se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos para diseño de pavimento 2

Parámetro	Valor
Tránsito	Medio (2.750.000 de ejes equivalentes)
Eje de diseño	Equivalente (8,2 ton)
Módulo resiliente Subrasante	35 MPa
Módulo resiliente de Subbase Granular	Definido por fórmulas de la Shell
Módulo resiliente de Base Granular	Ensayo de Modulo Resiliente (García, 2023)
Módulo dinámico de Carpeta Asfáltica	2.600 MPa
Relación de Poisson Subrasante	0,5
Relación de Poisson Subbase Granular	0,45
Relación de Poisson Base Granular	0,4
Relación de Poisson Carpeta Asfáltica	0,35
Espesor Carpeta Asfáltica	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura
Espesor Base Granular	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura
Espesor Subbase Granular	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura

Fuente: Elaboración propia de la autora.

El tránsito se definió como un tránsito medio correspondiente a la mitad del promedio de este tipo, establecida en 2.750.000 de ejes equivalentes, según consultas con expertos en estudios realizados en la zona.

El eje de diseño usado para este procedimiento fue el equivalente correspondiente a 8,2 ton, dadas sus condiciones estandarizadas y las intenciones de asemejar el diseño a circunstancias lo más reales posibles, pues este parámetro se hizo necesario para definir la distribución de cargas en la estructura vial.

El módulo resiliente definido para la subrasante con un valor de 35 MPa se definió así, dado que es el mínimo valor que exige la norma INVIAS para esta capa, además es un valor típico para los suelos que se encuentran en el municipio de Popayán.

En cuanto al módulo resiliente correspondiente a la subbase granular, este fue definido mediante la fórmula establecida por la Shell para calcular tal parámetro, la

cual se expone a continuación en la Ecuación 5 y donde se tiene en cuenta el espesor de la capa en estudio y el módulo resiliente de la capa que se encuentra en la posición inferior a esta. El valor asignado a este parámetro se especifica en el ítem 4.2, que se refiere a los resultados, pues, este valor fue determinado tras establecer los espesores de cada capa en la estructura del pavimento.

*Ecuación 5. Módulo resiliente para subbase granular de pavimento 2*

$$Mr_{SBG} = 0.206 * h_{SBG}^{0.45} * Mr_{SRT}$$

Donde:

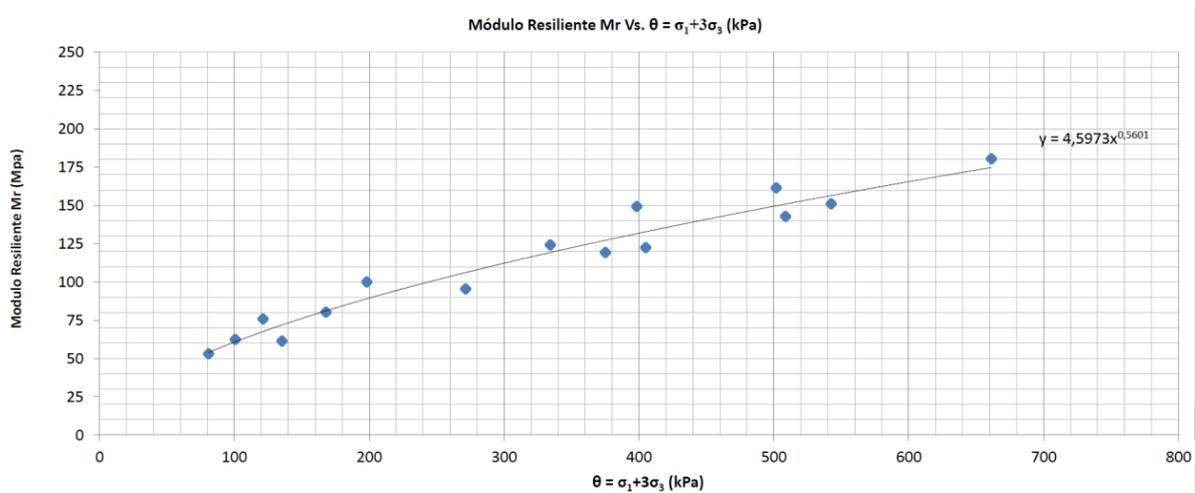
$Mr_{SBG}$  = Módulo resiliente para subbase granular

$(h_{SBG})$  = Espesor de la capa de subbase granular

$(Mr_{SRT})$  = Módulo resiliente de la subrasante

El módulo resiliente establecido para la base granular en este modelo donde su composición comprende AR (35%) combinados con un agregado de aporte (65%), se definió usando datos recopilados durante el estudio realizado por (García, 2023) que se presentan en la Gráfica 4, para lo cual también fue necesario obtener valores de los esfuerzos geostáticos y de carga aplicados a la capa en el espesor especificado en su diseño. El valor correspondiente a este parámetro se puede consultar en el ítem 4.2, donde se detalla después de asignar el espesor.

*Gráfica 4. Módulo Resiliente de base granular con AR*



Fuente: Tomado de (García, 2023).

El módulo dinámico destinado a medir la resistencia de la carpeta asfáltica en el campo plástico ante condiciones del tráfico vehicular, se designó como 2.600 MPa considerando un valor típico para mezclas asfálticas elaboradas en la zona, según consultas con especialista en el caso y lo establecido como valores típicos para este caso según recomendaciones de Witczack.

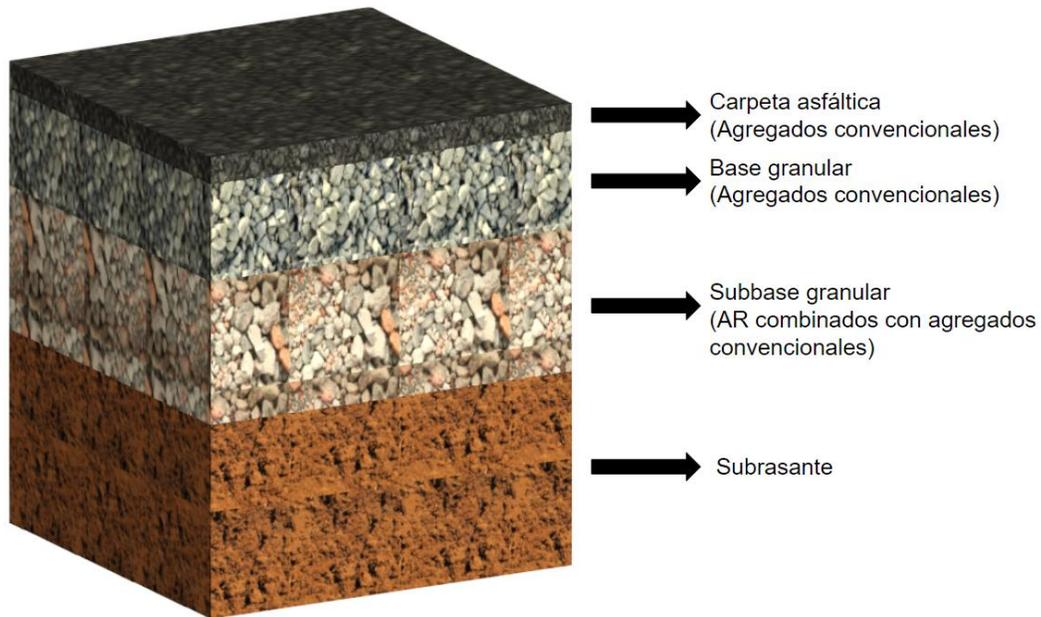
Relacionado con los datos usados para las relaciones de Poisson que establecen la deformación lateral respecto a la longitudinal de un material al ser sometido a una carga, estas se definieron con valores de 0,5, 0,45, 0,4, y 0,35 para la subrasante, la subbase granular, la base granular y la carpeta asfáltica respectivamente, de acuerdo a valores típicos para cada capa.

Los espesores definidos para las capas de esta estructura, se establecieron garantizando que las deformaciones máximas permitidas se cumplan tanto en la capa inferior de la carpeta asfáltica como en la capa superior de la subrasante, con el fin de conservar una uniformidad en las deformaciones observadas durante el estudio.

### **3.5.3 AR combinado con material de aporte en la subbase granular**

La configuración del tercer modelo de pavimento estuvo conformada por partículas naturales en su subrasante, base granular y carpeta asfáltica; por el contrario, la subbase granular, estuvo compuesta por AR dispuestos en conjunto con material granular de aporte, como se muestra en la Ilustración 32.

*Ilustración 32. Materiales empleados en la estructura de pavimento 3*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Los parámetros que se estipularon para esta estructura de pavimento, y que se introdujeron en el software Weslea para obtener las deformaciones de fatiga y ahuellamiento sufridas por el pavimento, se detallan en la Tabla 7.

*Tabla 7. Datos para diseño de pavimento 3*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tránsito	Medio (2.750.000 de ejes equivalentes)
Eje de diseño	Equivalente (8,2 ton)
Módulo resiliente Subrasante	35 MPa
Módulo resiliente de Subbase Granular	Ensayo de Modulo Resiliente (García, 2023)
Módulo resiliente de Base Granular	Definido por fórmulas de la Shell
Módulo dinámico de Carpeta Asfáltica	2.600 MPa
Relación de Poisson Subrasante	0,5
Relación de Poisson Subbase Granular	0,45
Relación de Poisson Base Granular	0,4
Relación de Poisson Carpeta Asfáltica	0,35
Espesor Carpeta Asfáltica	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura

Espeor Base Granular	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura
Espeor Subbase Granular	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura

Fuente: Elaboración propia de la autora.

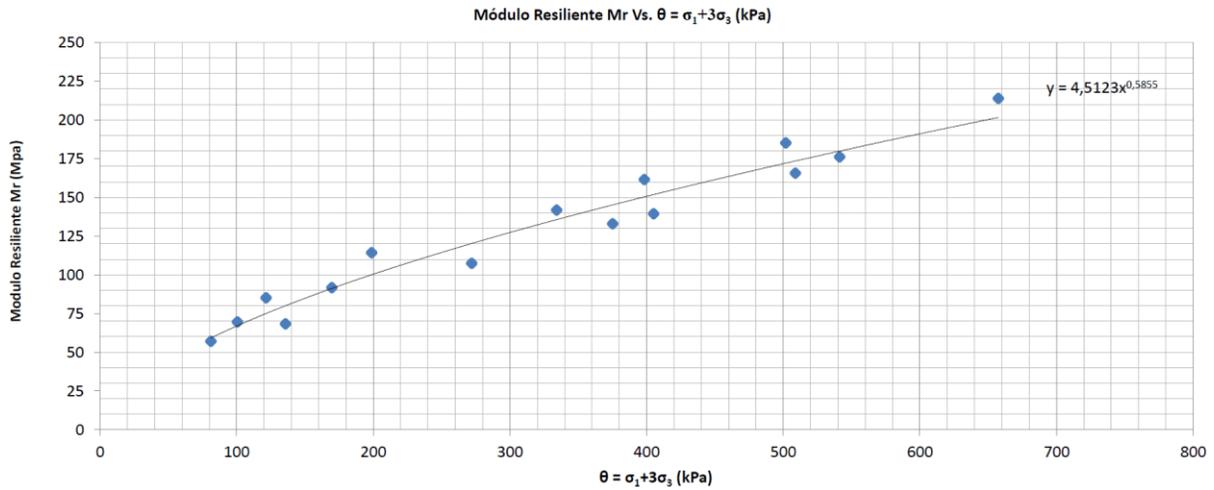
El tránsito se definió como un tránsito medio correspondiente a la mitad del promedio de este tipo, establecida en 2.750.000 de ejes equivalentes, según consultas con expertos en estudios realizados en la zona.

El eje de diseño usado para este procedimiento fue el equivalente, correspondiente a 8,2 ton, dadas sus condiciones estandarizadas y las intenciones de asemejar el diseño a circunstancias lo más reales posibles, pues este parámetro se hizo necesario para definir la distribución de cargas en la estructura vial.

El módulo resiliente definido para la subrasante con un valor de 35 MPa se definió así, dado que es el mínimo valor que exige la norma INVIAS para esta capa, además es un valor típico para los suelos que se encuentran en el municipio de Popayán.

En cuanto al módulo resiliente establecido para la subbase granular en esta estructura donde su composición comprende AR (80%) combinados con un agregado de aporte (20%), se definió usando datos recopilados durante el estudio realizado por (García, 2023), que se muestra en la Gráfica 5, para lo cual fue necesario la obtención de los esfuerzos geostáticos y de carga aplicados a la capa en el espesor especificado en su diseño. El valor de este parámetro se encuentra en el ítem 4.2, donde se detalla después de haber asignado el espesor.

Gráfica 5. Módulo Resiliente de subbase granular con AR



Fuente: Tomado de (García, 2023)

En cuanto al módulo resiliente correspondiente a la base granular, fue definido mediante la fórmula establecida por la Shell para calcular tal parámetro, la cual se expone a continuación en la Ecuación 6 y donde se tiene en cuenta el espesor de la capa en estudio y el módulo resiliente de la capa que se encuentra en la posición inferior a esta. El valor indicado se especifica en el ítem 4.2, que trata sobre los resultados, pues, este valor fue determinado tras establecer los espesores de cada capa en la estructura del pavimento.

Ecuación 6. Módulo resiliente para base granular de pavimento 3

$$Mr_{BG} = 0.206 * h_{BG}^{0.45} * Mr_{SBG}$$

Donde:

$Mr_{BG}$  =Módulo resiliente base granular

$(h_{BG})$  = Espesor de la capa de base granular

$(Mr_{SBG})$  = Módulo resiliente de la subbase granular

El módulo dinámico destinado a medir la resistencia de la carpeta asfáltica en el campo plástico ante condiciones del tráfico vehicular, se designó como 2.600 MPa considerando un valor típico para mezclas asfálticas elaboradas en la zona, según consultas con especialista en el caso y lo establecido como valores típicos para este caso según recomendaciones de Witczack.

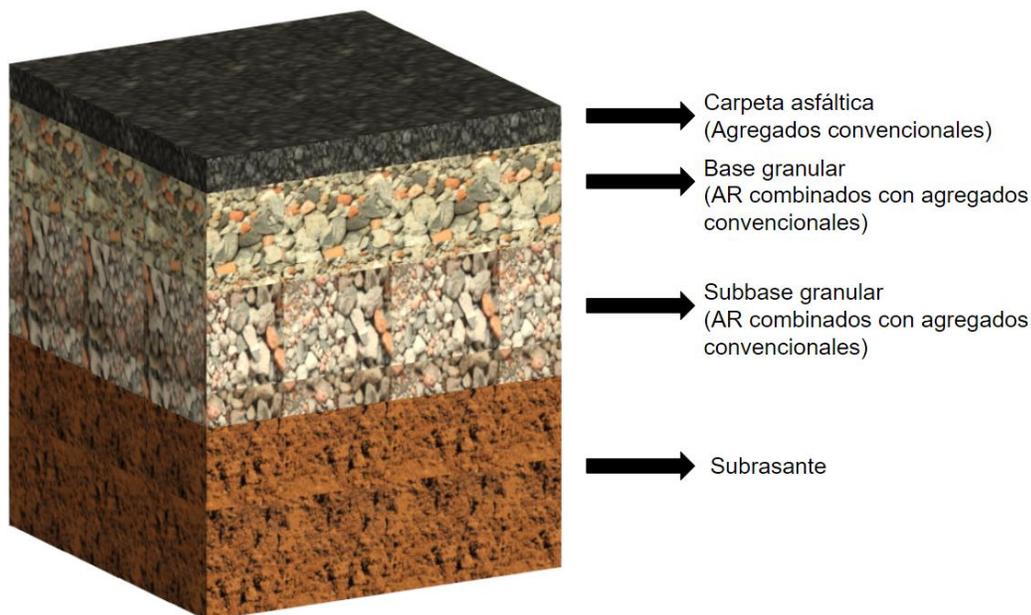
Relacionado con los datos usados para las relaciones de Poisson que establecen la deformación lateral respecto a la longitudinal de un material al ser sometido a una carga, estas se definieron con valores de 0,5, 0,45, 0,4, y 0,35 para la subrasante, la subbase granular, la base granular y la carpeta asfáltica respectivamente, de acuerdo a valores típicos para cada capa.

Los espesores definidos para las capas de esta estructura, se establecieron garantizando que las deformaciones máximas permitidas se cumplan tanto en la capa inferior de la carpeta asfáltica como en la capa superior de la subrasante, con el fin de conservar una uniformidad en las deformaciones observadas durante el estudio.

### 3.5.4 AR combinado con material de aporte en la base y subbase granular

La carpeta asfáltica y la subrasante fueron las únicas capas estructurales del pavimento diseñadas con materiales granulares convencionales. En contraste, la subbase y la base granular estuvieron compuestas por AR y material de aporte. En la Ilustración 33 se exhibe esta configuración.

*Ilustración 33. Materiales empleados en la estructura de pavimento 4*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Los parámetros que se estipularon para esta estructura de pavimento, así como los recursos usados para obtener algunos de ellos en casos específicos, y que se introdujeron en el software Weslea para obtener las deformaciones de fatiga y ahuellamiento sufridas por el pavimento, se detallan en la Tabla 8.

*Tabla 8. Datos para diseño de pavimento 4*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tránsito	Medio (2.750.000 de ejes equivalentes)
Eje de diseño	Equivalente (8,2 Ton)
Módulo resiliente Subrasante	35 MPa
Módulo resiliente de Subbase Granular	Ensayo de Modulo Resiliente (García, 2023)
Módulo resiliente de Base Granular	Ensayo de Modulo Resiliente (García, 2023)
Módulo dinámico de Carpeta Asfáltica	2600 MPa
Relación de Poisson Subrasante	0,5
Relación de Poisson Subbase Granular	0,45
Relación de Poisson Base Granular	0,4
Relación de Poisson Carpeta Asfáltica	0,35
Espesor Carpeta Asfáltica	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura
Espesor Base Granular	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura
Espesor Subbase Granular	Definido por iteración hasta obtener el valor que generara un comportamiento adecuado en la estructura

Fuente: Elaboración propia de la autora.

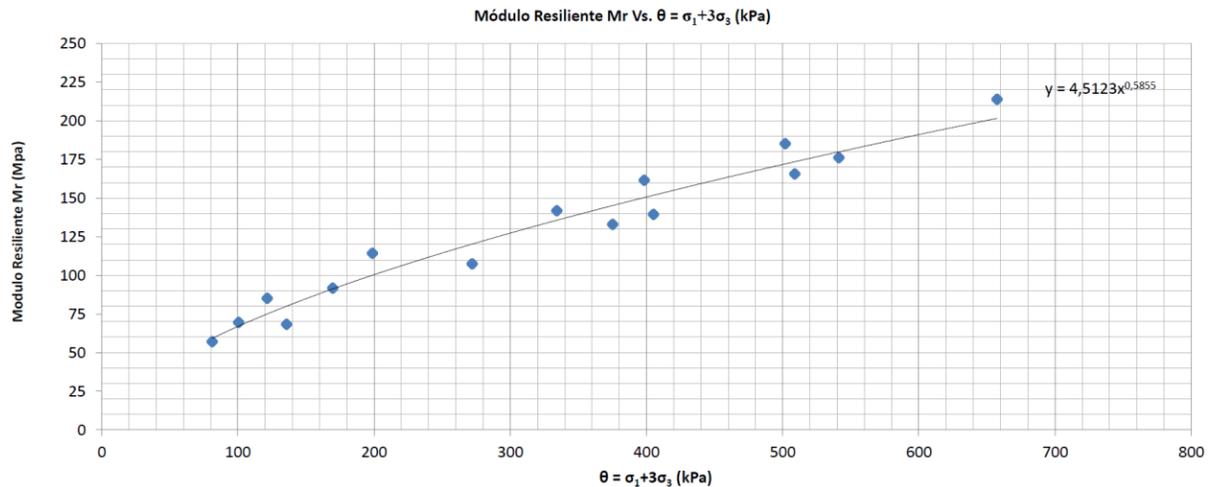
El tránsito se definió como un tránsito medio correspondiente a la mitad del promedio de este tipo, establecida en 2.750.000 de ejes equivalentes, según consultas con expertos en estudios realizados en la zona.

El eje de diseño usado para este procedimiento fue el equivalente correspondiente a 8,2 Ton, dadas sus condiciones estandarizadas y las intenciones de asemejar el diseño a circunstancias lo más reales posibles, pues este parámetro se hizo necesario para definir la distribución de cargas en la estructura vial.

El módulo resiliente definido para la subrasante con un valor de 35 MPa se definió así, dado que es el mínimo valor que exige la norma INVIAS para esta capa, además es un valor típico para los suelos que se encuentran en el municipio de Popayán.

Relacionado al módulo resiliente establecido para la subbase granular en esta estructura donde su composición comprende AR (80%) combinados con un agregado de aporte (20%), se definió usando datos recopilados durante el estudio realizado por (García, 2023) que se muestra en la Gráfica 6, para lo cual se obtuvieron los esfuerzos geostáticos y de carga aplicados a la capa en el espesor especificado en su diseño. El valor de este parámetro se encuentra en el ítem 4.2, donde se detalla después de haber asignado el espesor correspondiente.

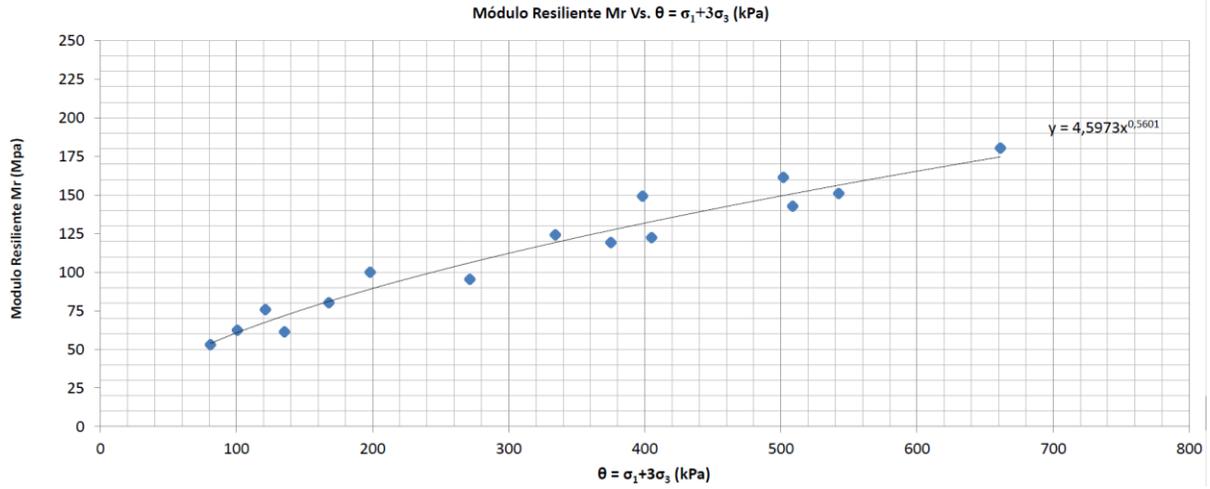
Gráfica 6. Módulo Resiliente de base granular con AR



Fuente: Tomado de (García, 2023)

El módulo resiliente establecido para la base granular en este modelo donde su composición comprende AR (35%) combinados con un agregado de aporte (65%), se definió usando datos recopilados durante el estudio realizado por (García, 2023) como se muestra en la Gráfica 7, para lo cual también fue necesario obtener valores de los esfuerzos geostáticos y de carga aplicados a la capa en el espesor especificado en su diseño. El valor correspondiente a este parámetro se puede consultar en el ítem 4.2, donde se detalla después de asignar la configuración estructural.

Gráfica 7. Módulo Resiliente de subbase granular con AR



Fuente: Tomado de (García, 2023)

El módulo dinámico destinado a medir la resistencia de la carpeta asfáltica en el campo plástico ante condiciones del tráfico vehicular, se designó como 2.600 MPa considerando un valor típico para mezclas asfálticas elaboradas en la zona, según consultas con especialista en el caso y lo establecido como valores típicos para este caso según recomendaciones de Witczack.

Relacionado con los datos usados para las relaciones de Poisson que establecen la deformación lateral respecto a la longitudinal de un material al ser sometido a una carga, estas se definieron con valores de 0,5, 0,45, 0,4, y 0,35 para la subrasante, la subbase granular, la base granular y la carpeta asfáltica respectivamente, de acuerdo a valores típicos para cada capa.

Los espesores definidos para las capas de esta estructura se exponen en el capítulo correspondiente a resultados, dado que fueron producto del estudio de su relación con las deformaciones producidas en el pavimento estándar.

### 3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE PAVIMENTOS CON DIFERENTES COMPOSICIONES DE MATERIALES EN SU ESTRUCTURA

Se obtuvieron los costos asociados a los 4 tipos de pavimentos creados usando AR en su composición de manera variada, considerando el costo por kilómetro de pavimento construido y cuyo ancho corresponde a 6 m que es lo regularmente

establecido para este tipo de obras, para así realizar la medición del impacto económico que tiene la implementación de este tipo de materiales no convencionales en las tarifas de construcción, teniendo en cuenta que debido a sus características distintivas, los espesores varían y en consecuencia sus costos también, esto con el fin de determinar cuál opción de las 4 propuestas resulta más viable financieramente o encaminarse hacia la determinación de parámetros que contribuirían a mejorar este aspecto.

### 3.6.1 Materiales convencionales en toda la estructura

Para el primer tipo de pavimento, cuya composición desde la subrasante hasta la capa asfáltica, estuvo compuesta por agregados naturales regularmente usados en la construcción de obras viales y para el cual los espesores de diseño quedaron definidos como 7 cm, 20 cm y 35 cm para la carpeta asfáltica, la base granular y la subbase granular respectivamente; fue necesario hacer uso de costos de material compactado definidos para agregados empleados en la zona y que se detallan a continuación en la Tabla 9.

*Tabla 9. Costos de materiales de pavimento 1*

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio</b>
Mezcla densa en caliente MDC-19 instalada	m <sup>3</sup>	\$795.980
Base granular Clase B instalada	m <sup>3</sup>	\$220.070
Subbase granular Clase B instalada	m <sup>3</sup>	\$210.090

Fuente: Elaboración propia de la autora.

### 3.6.2 AR combinado con material de aporte en la base granular

Relacionado con la segunda configuración de pavimento, cuya estructura comprende agregados naturales en la capa de la carpeta asfáltica, la subbase granular y la subrasante, y que de manera contraria, la base granular se compone por AR dispuesto en conjunto con material de aporte, donde los espesores estuvieron definidos como 9 cm 26 cm y 31 cm, nombrando los correspondientes desde la capa superior hasta la capa inferior; se manejaron costos que se resumen en la Tabla 10 para cada uno de los materiales.

*Tabla 10. Costos de materiales de pavimento 2*

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio</b>
Mezcla densa en caliente MDC-19 instalada	m <sup>3</sup>	\$795.980
Base granular Clase B instalada - Compuesta con AR	m <sup>3</sup>	\$198.300
Subbase granular Clase B instalada	m <sup>3</sup>	\$210.090

Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.6.3 AR combinado con material de aporte en la subbase granular**

De acuerdo a la composición definida para el pavimento 3, que consta de agregados naturales en toda su estructura a excepción de la subbase granular que está conformada por AR dispuesto en conjunto con material granular convencional y que los espesores de diseño quedaron definidos en 7 cm para la carpeta asfáltica, 25 cm en la base granular y 37 cm en la subbase granular, se dispuso de los costos que se resumen en la Tabla 11 para cada uno de los materiales y que se encuentran en concordancia con cifras reportadas por distribuidores de la zona.

*Tabla 11. Costos de materiales de pavimento 3*

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio</b>
Mezcla densa en caliente MDC-19 instalada	m <sup>3</sup>	\$795.980
Base granular Clase B instalada	m <sup>3</sup>	\$220.070
Subbase granular Clase B instalada - Compuesta con AR	m <sup>3</sup>	\$189.000

Fuente: Elaboración propia de la autora.

### **3.6.4 AR combinado con material de aporte en la base y subbase granular**

Para la definición de los costos asociados al pavimento 4 donde la carpeta asfáltica y la subrasante fueron compuestas por agregados convencionales y por el contrario la base y subbase granular fueron compuestas por AR dispuesto en conjunto con material granular de aporte, con espesores correspondientes a 9 cm, 26 cm y 35 cm, nombrados desde la capa superior hasta la inferior de la estructura, fue necesario emplear costos asociados a cada uno de los materiales según valores reportados por distribuidores de tales elementos en la zona, así como se expone en la Tabla 12.

Tabla 12. Costos de materiales de pavimento 4

Material	Unidad	Precio
Mezcla densa en caliente MDC-19 instalada	m <sup>3</sup>	\$795.980
Base granular Clase B instalada – Compuesta con AR	m <sup>3</sup>	\$198.300
Subbase granular Clase B instalada – Compuesta con AR	m <sup>3</sup>	\$189.000

Fuente: Elaboración propia de la autora.

### 3.9 EVALUACIÓN DE VARIACIÓN GRANULOMÉTRICA

Se determinó la variación granulométrica que sufren los agregados reciclados usados como una base y subbase granular, posterior a su proceso de compactación en campo, pues dada la alta susceptibilidad a la quiebra inherente de este tipo de material, la determinación del cambio del tamaño de sus partículas, es crucial para identificar si la granulometría después de compactación resulta muy distinta a la granulometría inicialmente determinada para el árido, con el fin de que en caso de que esta variación resulte en cambios abruptos, se realice un ajuste para el tamaño de las partículas con que se debería emplear el agregado inicialmente, por medio de estimaciones matemáticas y que este una vez empleado en la construcción de la carretera no sobrepase los límites inferior ni superior de la granulometría requerida.

Para la realización de esta prueba, inicialmente se determinó la granulometría para una base granular 40 y una subbase granular 50, según las granulometrías establecidas por la normativa INVIAS para este tipo de materiales, los cuales se constituyeron por agregados reciclados, una vez con estas gradaciones, se realizó el ensayo de proctor modificado a cada uno de los dos tipos de materiales para establecer la humedad óptima a la cual se obtendría la densidad máxima y se comportarían de mejor manera en términos de rigidez, posteriormente, se realizó otro ensayo de proctor modificado empleando las granulometrías establecidas y las humedades óptimas encontradas, para que, mediante estos términos se simulara la compactación a la cual se sometería el material en condiciones reales de trabajo en campo; una vez hecho este proceso, se retiró el material del molde de ensayo de proctor modificado para chequear el cambio sufrido en la granulometría de los materiales al ser sometidos a estas acciones considerando la degradación solo a partir del tamiz de ¾" dado que solo partículas de este tamaño e inferiores son las que se pueden emplear en el molde para dicho ensayo, estableciendo si se debía hacer algún ajuste, el cual se determinó por una ecuación que permitió establecer una granulometría de trabajo inicial a la cual se debe entonces emplear el material antes de su compactación, para que al realizar este trabajo, no sobrepase los límites inferior ni superior establecidos para los tamaños de sus partículas.

### **3.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Se llevó a cabo la interpretación de los resultados obtenidos a lo largo de todo el proceso de estudio. Basándose principalmente en lo exigido por la norma INVIAS y en criterios ingenieriles.

### **3.11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Finalmente, se identificaron las conclusiones de todo el estudio realizado y se formularon recomendaciones para futuras investigaciones.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de todos los estudios llevados a cabo en la investigación, junto con sus análisis correspondientes, que permiten determinar la viabilidad de utilizar RCD en la estructura de un pavimento como capas de base y subbase granular.

### 4.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

A continuación, se muestran los resultados relacionados con la medición de las características de composición, dureza, durabilidad, limpieza, geometría y resistencia del material obtenidos por medio de ensayos de laboratorio, se analiza su viabilidad de utilización en pavimentación de acuerdo a los valores obtenidos y se hace una comparación con los criterios exigidos en la normativa INVIAS para determinar su idoneidad de utilización en dicho campo.

#### 4.1.1 Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 $\mu\text{m}$ (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado INV E – 214 – 22

Una vez realizado el ensayo de determinación de la cantidad de material que pasa por el tamiz No.200, se obtuvo un porcentaje de masa correspondiente al 6,4% del material de AR, tal como se muestra en la Tabla 13.

*Tabla 13. Porcentaje de material fino que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200)*

B: Masa original de la muestra seca (g)	24.675
C: Masa de la muestra seca después de lavada (g)	23.090
<b>A: (Porcentaje del material fino que pasa el tamiz de 75 <math>\mu\text{m}</math> (No. 200), obtenido por lavado %)</b>	<b>6,4</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Este resultado revela que el material de AR exhibe una proporción moderada de partículas de tamaño inferior a 75  $\mu\text{m}$ , lo cual sugiere que el material no es susceptible a cambios significativos en su composición, teniendo en cuenta los procesos de transporte y manipulación en laboratorio a los cuales ha sido expuesto. Además, la presencia moderada de partículas finas, en combinación con otros materiales potencialmente reactivos con el agua, podría contribuir positivamente a

mejorar las propiedades de resistencia del AR. Es importante destacar que la cantidad de partículas finas detectadas sugiere que el material puede considerarse limpio, con una presencia mínima de materiales indeseados, como la arcilla, que podrían afectar su calidad y desempeño.

#### 4.1.2 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E – 213 – 22

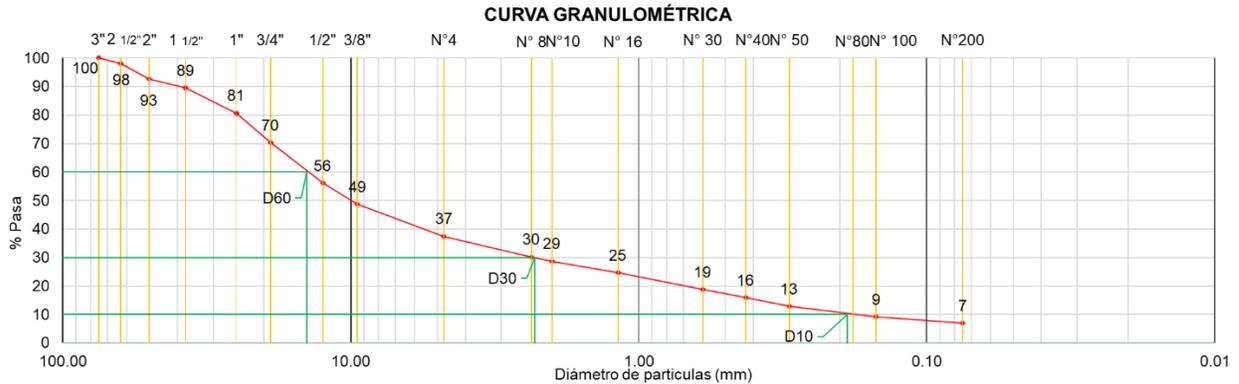
Los resultados del análisis granulométrico realizado al material de AR revelan una distribución diversa de tamaños de partículas, abarcando una amplia gama de las mismas. Detalladamente, el 62,5% del material se compone de partículas gruesas, mientras que el 30,6% corresponde a la categoría de arena y el 6,9% a material fino. Esta distribución indica una composición heterogénea en el RCD, con predominio de grava seguida de arena y finos, como se muestra en la Tabla 14 y en la Gráfica 8.

Tabla 14. Granulometría de los agregados grueso y fino del AR

Tamiz	mm	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
3"	75,0	0	0	0	100
2 1/2"	63,0	452,5	1,8	1,8	98
2"	50,0	1.364,6	5,5	7,4	93
1 1/2"	37,5	773,5	3,1	10,5	89
1"	25,0	2.168,6	8,8	19,3	81
3/4"	19,0	2.550,0	10,3	29,6	70
1/2"	12,5	3.494,7	14,2	43,8	56
3/8"	9,5	1.845,0	7,5	51,3	49
No. 4	4,75	2.778,2	11,3	62,5	37
No. 8	2,36	1.775,0	7,2	69,7	30
No. 10	2,00	388,8	1,6	71,3	29
No. 16	1,18	1.008,3	4,1	75,4	25
No. 30	0,6	1.427,5	5,8	81,2	19
No. 40	0,425	692,2	2,8	84,0	16
No. 50	0,3	767,4	3,1	87,1	13
No. 100	0,15	920,8	3,7	90,8	9
No. 200	0,075	551,9	2,2	93,1	7
Fondo	0	1.707,8	6,9	100,0	0
Sumatoria		24.666,8	100,0		
Peso seco inicial		24.675,0			

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 8. Curva granulométrica AR



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Según el sistema SUCS, el material se encuentra clasificado como una grava, que además es bien gradada con finos arcillosos (GW-GC). Además, los coeficientes de uniformidad y de curvatura derivados de la distribución granulométrica del material son 76 y 2 respectivamente.

El módulo de finura, que indica la finura del AR y su capacidad para llenar los vacíos entre partículas, es de 5,6 para el agregado completo y de 4,0 para el agregado fino que pasa por el tamiz No.4, indicando un valor adecuado para tal parámetro.

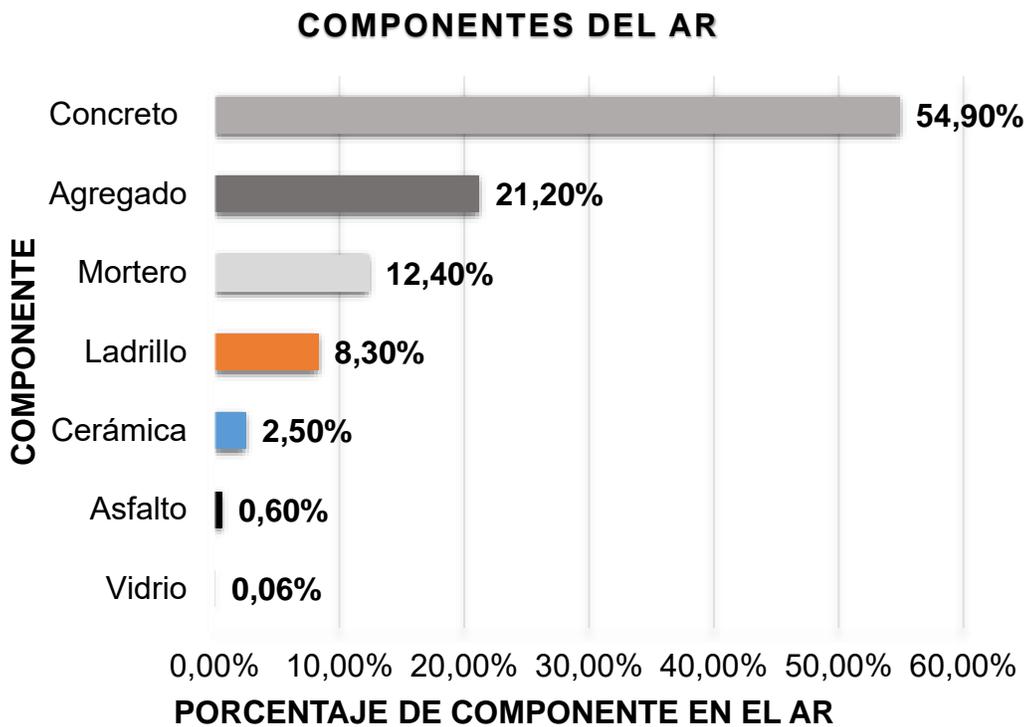
En general, la distribución adecuada de partículas en el material de AR lo hace posicionar en capacidad para su aplicación en pavimentación, demostrando su idoneidad en este aspecto.

#### 4.1.3 Determinación de componentes del AR

Tras analizar los resultados obtenidos en este ensayo, se puede apreciar una amplia diversidad de materiales presentes en el AR. Destacando, en primer lugar, al concreto como componente principal, con aproximadamente el 54,9% del total. Acompañando esta cifra, se identificaron proporciones significativas de agregado y mortero, constituyendo el 21,2% y el 12,4% respectivamente. Además, se observó la inclusión de otros materiales como ladrillo, con una contribución del 8,3% y cerámica, representando un 2,5% del total. Por último, aunque en proporciones menores, también se registró una presencia leve de asfalto y vidrio, representando aproximadamente el 0,6% y el 0,06% del total respectivamente. El resumen de estos

resultados y la fracción correspondiente a cada tamaño de material se recopilan en la Gráfica 9 y en la Tabla 15.

Gráfica 9. Componentes del AR



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Tabla 15. Porcentajes de componentes del AR

Tamiz	mm	Peso retenido en granulometría (g)	% Retenido de la fracción en la muestra total	% Retenido fracción (3" a No.4)	Partículas												Total % por fracción		
					Agregado (g)	% En la fracción	Asfalto (g)	% En la fracción	Cerámico (g)	% En la fracción	Concreto (g)	% En la fracción	Ladrillo (g)	% En la fracción	Mortero (g)	% En la fracción		Vidrio (g)	% En la fracción
3"	75,0	0	0,0	0															0
2 1/2"	63,0	452,5	1,8	3						452,5	100								100
2"	50,0	1.364,6	5,5	9						1.206,4	88	158,2	12						100
1 1/2"	37,5	773,5	3,1	5					93,0	12	680,5	88							100
1"	25,0	2.168,6	8,8	14	278,2	13			110,0	5	1.367,9	63	209,7	10	202,8	9			100
3/4"	19,0	2.550,0	10,3	17	730,6	29			63,6	2	1.171,4	46	170,4	7	415,0	16			100
1/2"	12,5	3.494,7	14,2	23	1.143,5	33	35,6	1,0	29,1	1	1.044,4	30	236,4	7	1.005,7	29			100
3/8"	9,5	1.845,0	7,5	12	566,4	31			64,7	4	1.009,8	55	194,8	11			9,3	1	100
No.4	4,75	2.778,2	11,3	18	558,9	20	53,0	1,9	22,8	1	1.540,6	55	314,5	11	286,8	10			100
<b>Total</b>			62,5	100	3.277,6		88,6		383,2		8.473,6		1.284,0		1.910,3		9,3		
<b>Sumatoria (3" a No.4)</b>	15.427																		
<b>% Total fracción (3" a No.4)</b>					21,2		0,6		2,5		54,9		8,3		12,4		0,06		100,0

Fuente: Elaboración propia de la autora.

La presencia de material cementicio en una cantidad significativa de concreto y mortero puede indicar un potencial para mejorar la estabilidad y resistencia del material en sus diversas aplicaciones. Al actuar como aglutinante, el cemento mejora la cohesión y el soporte de las partículas al mezclarse con agua, lo que incrementa el valor de los residuos de construcción y demolición (RCD). Además, el impacto de otros componentes en menor proporción dependerá de su comportamiento, que se evalúa con ensayos específicos para determinar su contribución al rendimiento del material. Conocer la composición detallada de estos materiales es crucial para entender su calidad y homogeneidad.

#### 4.1.4 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), densidad aparente y absorción del agregado fino INV E – 222 – 22

Los datos recolectados al someter la fracción pasante del tamiz No.4 y retenida en el tamiz No.200 de AR a pruebas para determinar su densidad relativa seca al horno, densidad relativa en condición saturada superficialmente seca, densidad

relativa aparente y porcentaje de absorción, mostraron valores de 2,210, 2,401, 2,731 y 8,6%, respectivamente. Estos resultados se encuentran detallados en la Tabla 16 para su referencia.

*Tabla 16. Densidad, densidad relativa (gravedad específica), densidad aparente y absorción del agregado fino*

<b>Densidad relativa (Gs - SH)</b>	<b>2,210</b>
<b>Densidad relativa (Gs - SSS)</b>	<b>2,401</b>
<b>Densidad relativa aparente (Gs - Aparente)</b>	<b>2,731</b>
<b>Absorción, %</b>	<b>8,6</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Se puede evidenciar entonces que las gravedades específicas (Gs) de la fracción fina del material de AR se sitúan por fuera del rango típico esperado para agregados naturales, el cual generalmente oscila entre 2,60 y 2,70; evidenciando una densidad más reducida que las usualmente reportadas y que se encuentra en línea con las que se obtienen de manera frecuente para los AR, debido a la presencia de materiales porosos tales como la cerámica y el ladrillo y también de componentes con densidades bajas que reducen este valor, tales como el mortero, el asfalto o adhesivos de la cerámica, los cuales tienen valores de densidad inferiores a 2, contribuyendo así a la disminución de la misma en todo el conjunto.

El porcentaje de absorción medido exhibe un nivel relativamente alto, una característica común en agregados de este tipo, particularmente en su fracción fina, resultando en valores más altos que el promedio, cercanos al 2%, para un agregado convencional.

Es importante señalar que una baja densidad en relación con la convencionalmente atribuida a agregados naturales y una alta capacidad de absorción no siempre reflejan una calidad inferior del material. En efecto, estas propiedades son propias del material y ofrecen información útil sobre su composición.

#### **4.1.5 Densidad, densidad relativa (gravedad específica), densidad aparente y absorción del agregado grueso INV E – 223 – 22**

Los resultados obtenidos para la fracción pasante del tamiz de 2" y retenida en la malla No.4 de RCD, al realizar la prueba que permite determinar la densidad relativa

seca al horno, la densidad relativa en condición saturada superficialmente seca, la densidad relativa aparente y el porcentaje de absorción del agregado grueso del material, reportaron valores correspondientes a 2,080, 2,242, 2,482 y 7,8% respectivamente, tal y como se presentan en la Tabla 17.

*Tabla 17. Densidad, densidad relativa (gravedad específica), densidad aparente y absorción del agregado grueso*

<b>Densidad relativa (Gs - SH)</b>	<b>2,080</b>
<b>Densidad relativa (Gs - SSS)</b>	<b>2,242</b>
<b>Densidad relativa aparente (Gs - Aparente)</b>	<b>2,482</b>
<b>Absorción, %</b>	<b>7,8</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Estos valores revelan que las densidades del material se encuentran un tanto alejadas del rango típico observado para agregados convencionales, los cuales oscilan entre 2,6 y 2,7; esta discrepancia es atribuible a la diversidad de componentes presentes en el material, tales como ladrillos, mortero, concreto, cerámica, vidrio y asfalto, los cuales, al ser más livianos, contribuyen a variar este parámetro, además de poseer características porosas.

El porcentaje de absorción medido exhibe un nivel relativamente alto, una característica común en agregados de este tipo debido a su estructura porosa y la presencia de capilares que facilitan la infiltración y distribución del agua dentro de la muestra. Por lo tanto, es normal encontrar valores más altos que el promedio de alrededor del 2% para un agregado convencional.

Es esencial destacar que la baja densidad y la alta absorción no necesariamente indican una calidad inferior del material. Más bien, estas características son inherentes al material y proporcionan información valiosa sobre su composición.

#### **4.1.6 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles INV E – 218 – 22**

Los resultados del ensayo en la máquina de los Ángeles revelan que el material de AR experimenta pérdidas del 11% y 42% de su masa seca de ensayo a 100 y 500 revoluciones respectivamente.

Se determinó que el material muestra un alto desgaste de partículas para una base granular evaluado a 100 revoluciones, excediendo los límites especificados para todos los niveles de tráfico ( $NT1 \leq 8\%$ ,  $NT2 \leq 8\%$  y  $NT3 \leq 7\%$ ). De igual manera, a 500 revoluciones, el material no cumple con los requisitos para ningún tipo de tránsito ( $NT1 \leq 40\%$ ,  $NT2 \leq 40\%$  y  $NT3 \leq 35\%$ ).

En cuanto a la subbase granular, se observa que el material cumple con los requisitos para todos los niveles de tránsito a 500 revoluciones ( $NT1 \leq 50\%$ ,  $NT2 \leq 50\%$  y  $NT3 \leq 50\%$ ), que es la frecuencia a la cual se evalúa este tipo de material.

Es así como se puede concluir que el material exhibe una dureza moderadamente baja, ya que sus resultados están cerca de los requerimientos para su uso como capas de base y subbase según las normativas del INVIAS. Por lo tanto, se sugiere que la extracción de los componentes de ladrillo y mortero del AR, conocidos por su baja resistencia a la abrasión, o considerar la combinación con un agregado que mejore estas características de dureza reduciría la fragilidad del material, la susceptibilidad a la deformación, rotura o desgaste excesivo, sin comprometer su durabilidad y rendimiento a largo plazo.

#### **4.1.7 Determinación del valor del 10% de finos INV E – 224 – 22**

El valor obtenido como esfuerzo máximo soportado por el agregado grueso del material de AR en la prueba de determinación del valor de carga que produce un 10% de finos en estado seco, se registró como 70,7 kN.

Según la Tabla 330-2 de las Especificaciones INVIAS para bases granulares, para la clase A (NT3), el valor mínimo requerido para la evaluación de la resistencia mecánica mediante el método del 10% de finos es de 90 kN; sin embargo, el resultado obtenido no cumple con este requisito. Por otro lado, para la clase B (NT2), el requisito es de 70 kN, y el resultado reportado se encuentra dentro del rango aceptable. Es importante tener en cuenta que para la clase C no existe una especificación establecida para este parámetro, por lo tanto, el material es apto para el nivel de tránsito correspondiente, es decir, un NT1.

Por otro lado, según las especificaciones de la Tabla 320-2 del INVIAS para la evaluación de la calidad de los agregados destinados a su uso en la subbase granular, no se establece que este indicador sea necesario para la determinación

de su aplicabilidad, lo que indica que el material es apto para una subbase granular según este criterio.

De manera general, el resultado señala una adecuada resistencia a la deformación y fragmentación del material ante cargas específicas, destacando la idoneidad de los AR en construcciones de pavimentación, aun teniendo en cuenta su susceptibilidad a la quiebra, que podría mejorar con la adición de otro AR con características un tanto mejores en esta condición o con un agregado natural de aporte, para elevar el esfuerzo al que debe ser sometido para producir un 10% de finos. Es importante destacar que el componente que produjo la mayor cantidad de finos en este ensayo fue el ladrillo, evidenciado por su desintegración tras la prueba, lo cual sugiere que una extracción selectiva de este material podría mejorar los resultados reportados. Es así como este material se considera apto en aplicaciones donde se requiere estabilidad y durabilidad.

#### 4.1.8 Solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio INV E – 220 – 22

En el proceso de realización del ensayo de solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio para medir el comportamiento del material al simular condiciones de intemperismo, se pudieron observar una serie de eventualidades particulares al someterlo a la evaluación requerida. En los 2 ciclos iniciales el material se comportó de manera regular o similar a lo que le ocurre a un agregado convencional; este, absorbió solución en la fase de inmersión y se formaron cristales propios de la solución; tras pasarlo por la etapa de secado, el material demostró también un comportamiento típico, tal y como se presenta en la Ilustración 34.

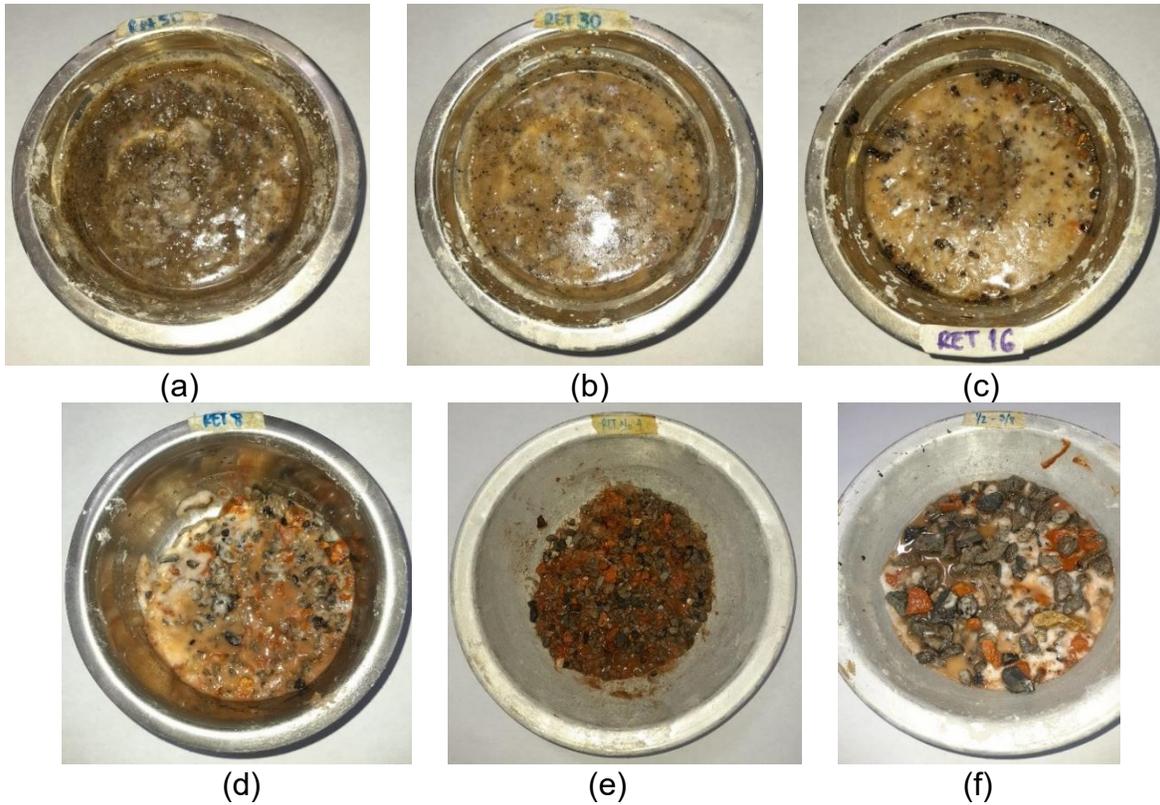
*Ilustración 34. Comportamiento inicial del AR en el ensayo de solidez: (a) Material posterior al segundo ciclo en contacto con sulfato de magnesio, (b) Cristalización por sulfatos, (c) Muestra posterior a secado en horno*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

A partir del tercer ciclo se pudo observar que, en las partículas de la fracción fina y parte de la fracción gruesa, como lo son las correspondientes a tamaños retenidos en el tamiz de 3/8", la solución manifestó un color blanco con aspecto gelatinoso, lo que obstaculizó el adecuado escurrimiento de las fracciones según lo estipulado por la normativa y creó una relación directa a lo que ocurre cuando el cemento se mezcla con este tipo de sustancias, que desencadenan una reacción química, la cual se deriva en este comportamiento, pues, el cemento al contener hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) formado durante su hidratación con el agua presente en la solución, entra en contacto con el sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ) y reaccionan formando sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) junto con agua, y también, de la misma manera, el sulfato de magnesio puede reaccionar con el aluminato de calcio (CA) presente en el cemento, para formar ettringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$ ) que es un mineral sulfato; formando así pastas o en este caso sustancias con el aspecto que se puede visualizar en la Ilustración 35, indicando además la gran cantidad de dicho componente de cemento que se encuentra en los AR y que es una respuesta favorable ante las condiciones de cementación que llegan a desarrollarse al este entrar en contacto con agua; este comportamiento observado también puede ser atribuible a la presencia de ladrillos que poseen gran capacidad de absorción y al entrar en contacto de manera prolongada con sustancias como el sulfato de magnesio que generan su deterioro, resulta en ese sentido en la formación de sustancias gelatinosas, como se muestra seguidamente.

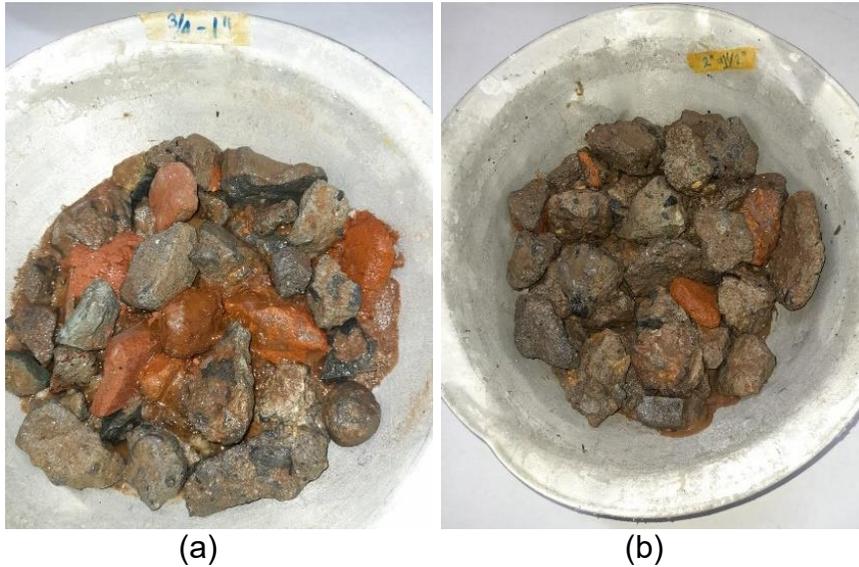
*Ilustración 35. Comportamiento del AR a partir del tercer ciclo del ensayo de solidez: (a) Material retenido tamiz #50, (b) Material retenido tamiz #40, (c) Material retenido tamiz #16, (d) Material retenido tamiz #8, (e) Material retenido tamiz #4, (f) Material retenido 3/8"*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

En la fracción gruesa del material, compuesta principalmente por concreto y agregados y donde son más perceptibles las variabilidades que sufre el árido debido al tamaño de sus partículas, se pudo observar que no se presenta la solución blanca o gelatinosa en una proporción elevada, dado que esta parte del árido no contiene finos, donde dicho comportamiento es más notable, por el contrario, se percibe el deterioro del ladrillo tipo tolete de manera directa, tal como se muestra en la Ilustración 36, demostrando que este es uno de los componentes que podría afectar la estructura del pavimento si se encuentra en grandes cantidades en el AR, por lo cual se determinó la realización de la medición del impacto del retiro de las fracciones de ladrillo en un nuevo ensayo de solidez sin este componente como se presenta en el numeral 4.1.9 para esta parte del material.

*Ilustración 36. Comportamiento de la fracción gruesa del AR en el ensayo de solidez: (a) Material retenido tamiz 1", (b) Material retenido tamiz 1½"*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Finalmente, los resultados cuantitativos que se obtuvieron de esta prueba, demostraron que para la fracción gruesa del material la pérdida ponderada varía de 0,7% a 4,3% para cada uno de los tamices, y la pérdida total ponderada corresponde a 12%, lo que indica una resistencia razonable, mostrando así que el agregado grueso es adecuado para resistir la acción de agentes externos que podrían afectar su integridad estructural, mientras que en la fracción fina se observa que la pérdida ponderada varía de 4,6% a 12,8% para cada uno de los tamices, y la pérdida total ponderada alcanza un valor de 37%, lo que sugiere una susceptibilidad significativa a la desintegración en ciertos tamaños de tamiz que se puede mejorar con un agregado de características un tanto superiores en esta porción; pues, al contrastar estos resultados con los valores exigidos en la Tabla 320.2 y 330.2 de la normativa INVIAS como requerimientos para subbases y bases granulares respectivamente, se puede concluir que el agregado grueso es válido para ser usado como una subbase o base granular de clase A, B o C, teniendo en cuenta que el valor máximo para este parámetro corresponde al 18% de desgaste; por otro lado, en cuanto a la fracción fina se puede notar que esta supera el límite máximo especificado para subbases y bases granular correspondiente al 18%, evidenciando así que esta fracción es susceptible a los cambios generados por el intemperismo.

La Tabla 18 muestra los resultados de la prueba realizada.

Tabla 18. Resultados cuantitativos de solidez en sulfato de magnesio

Tamaño del tamiz		Peso Retenido (g)	Gradación de la muestra original (%)	Masa de las fracciones antes del ensayo (g)	Masa después del ensayo (g)	Masa pasa del tamiz designado (g)	%Pasa del tamiz después de ensayo	Pérdida Ponderada (%)
<i>Pasa</i>	<i>Retenido</i>	<b>Ensayo de solidez sobre el agregado grueso</b>						
2 1/2	1 1/2	2.138,1	14,3	5.095	4.856,4	238,6	4,7	0,7
1 1/2	3/4	4.718,6	31,5	1.515	1.375	140	9,2	2,9
3/4	3/8	5.339,7	35,7	1.000	890	110	11,0	3,9
3/8	4	2.778,2	18,6	300	230	70	23,3	4,3
Total		14.974,6	100	SUMATORIA				<b>12</b>
<i>Pasa</i>	<i>Retenido</i>	<b>Ensayo de solidez sobre el agregado fino</b>						
Menor No.100		2.259,7	18,8	-	-	-	-	-
No.50	No, 100	920,8	7,7	-	-	-	-	-
No.30	No,50	1.459,6	12,1	100,2	62,4	37,8	37,7	4,6
No.16	No,30	1.427,5	11,9	100	57,5	42,5	42,5	5,0
No.8	No,16	1.397,1	11,6	100	27,5	72,5	72,5	8,4
No. 4	No,8	1.775	14,8	100,1	57,2	42,9	42,9	6,3
3/8	No,4	2.778,2	23,1	100,1	44,5	55,6	55,5	12,8
Total		12.017,9	100,0	Sumatoria				<b>37</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Es importante añadir que, de acuerdo a la inspección cualitativa realizada para evaluar también el efecto del sulfato de magnesio sobre los agregados de tamaño mayor a  $\frac{3}{4}$ " de una manera más visual, e identificar los efectos de rotura, desintegración, agrietamiento y exfoliación, se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación en la Tabla 19, donde se evidencia que las partículas gruesas sufrieron alteraciones leves, demostradas a través de sus bajos porcentajes de deterioro en los tamaños analizados, a excepción de la exfoliación presentada en el tamaño de tamiz de  $1\frac{1}{2}$ " a  $\frac{3}{4}$ " donde se puede presentar este fenómeno debido a la inducción de la solución en estas partículas con un alto porcentaje de absorción que posterior a los procesos de congelación y descongelación (intemperismo) produce la desintegración de las partículas. De igual manera, los resultados indican que el agregado cuenta con unas características de

integridad y calidad elevadas a pesar de ser un material reciclado, pues las alteraciones percibidas no son significativas demostrando la viabilidad del uso de este material ante esta condición evaluada.

Tabla 19. Resultados cualitativos de solidez en sulfato de magnesio

Examen cualitativo de las partículas gruesas										
Tamiz		Partículas que exhiben alteración								No. Total de partículas antes del ensayo
		Rotura		Desintegración		Agrietamiento		Exfoliación		
Pasa	Retenido	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
2 1/2	1 1/2	0	0	1	4	0	0	0	0	23
1 1/2	No. 3/4	2	5	1	3	2	5	5	14	37
										

Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### 4.1.9 Solidez de los agregados (sin ladrillo) frente a la acción de solución de sulfato de magnesio INV E – 220 – 22

Al realizar el ensayo de solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio eliminando el ladrillo de la composición de los AR, se pudo percibir que el agregado cambió su comportamiento notablemente. Esto se reflejó tanto en las observaciones realizadas en el laboratorio como en los valores de desgaste de las partículas, que se presentan en la Ilustración 37 y en la Tabla 20, donde evidentemente al suprimir el ladrillo del material, su desgaste tampoco se detecta y los valores de desgaste reducen.

Ilustración 37. Ensayo de solidez para la fracción gruesa sin ladrillos: (a) Material luego de proceso de secado en horno, (b) Partículas gruesas luego de secado en horno



(a) (b)  
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Tabla 20. Resultados cuantitativos de solidez en sulfato de magnesio (AR sin ladrillo)

Tamaño del tamiz		Peso Retenido (g)	Gradación de la muestra original (%)	Masa de las fracciones antes del ensayo (g)	Masa después del ensayo (g)	Masa pasa del tamiz designado (g)	%Pasa del tamiz después de ensayo	Pérdida Ponderada (%)
<i>Pasa</i>	<i>Retenido</i>	<b>Ensayo de solidez sobre el agregado grueso</b>						
2 1/2	1 1/2	2.138,1	14,3	5.265	5.260	5	0,1	0,0
1 1/2	3/4	4.718,6	31,5	1.550	1.535	15	1,0	0,3
3/4	3/8	5.339,7	35,7	1.000	975	25	2,5	0,9
3/8	No.4	2.778,2	18,6	300,1	256.5	43,6	14,5	2,7
Total		14.974,6	100	Sumatoria				<b>4</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Los resultados cuantitativos de la prueba evidencian cómo se reduce el desgaste de las partículas en un 66,66%, pues la pérdida ponderada total del agregado grueso pasa de un 12% a un 4% revelando las mejoras significativas en cuanto a durabilidad y resistencia de esta determinación. Además, de acuerdo a las

especificaciones establecidas en la Tabla 320 - 2 (Requisitos de los agregados para subbases granulares) y en la Tabla 330 – 2 (Requisitos de los agregados para bases granulares) indican que el agregado grueso del AR cumple con estas especificaciones, dado que su porcentaje de pérdida se ubica muy por debajo del límite máximo especificado del 18%, indicando que es válido para su uso como una subbase granular o una base granular de clase A, B o C.

Respecto a la inspección cualitativa, se pone de manifiesto que la presencia de ladrillo parece mitigar algunas formas de degradación física debido a su capacidad para redistribuir tensiones, mientras que su eliminación expone las partículas más duras y frágiles a condiciones de prueba más severas, resultando en tasas elevadas de desintegración y exfoliación como se muestra en la Tabla 21. Esto indica que la eliminación del ladrillo puede mejorar la resistencia general del agregado en términos de pérdida de masa, pero también puede incrementar la susceptibilidad a ciertas formas de alteración física. Es decir, aunque la eliminación del ladrillo puede tener beneficios en la mejora de la solidez del agregado grueso, también introduce un mayor riesgo de alteración física, especialmente bajo condiciones de prueba agresivas como la exposición a sulfatos, por ello, la determinación de la viabilidad de la escogencia de la eliminación del ladrillo en cuanto a características cualitativas o cuantitativas dependerá de las condiciones de la obra donde se va a dar la aplicabilidad del agregado.

*Tabla 21. Resultados cualitativos de solidez en sulfato de magnesio (AR sin ladrillo)*

<b>Examen cualitativo de las partículas gruesas</b>										
<b>Tamaño del tamiz</b>		<b>Partículas que exhiben alteración</b>								<b>No. Total de partículas antes del ensayo</b>
		<b>Rotura</b>		<b>Desintegración</b>		<b>Agrietamiento</b>		<b>Exfoliación</b>		
<b>Pasa</b>	<b>Retenido</b>	<b>No.</b>	<b>%</b>	<b>No.</b>	<b>%</b>	<b>No.</b>	<b>%</b>	<b>No.</b>	<b>%</b>	
2 1/2	1 1/2	0	0	5	16	1	3	13	42	31
1 1/2	3/4	4	7	5	9	5	9	27	47	58

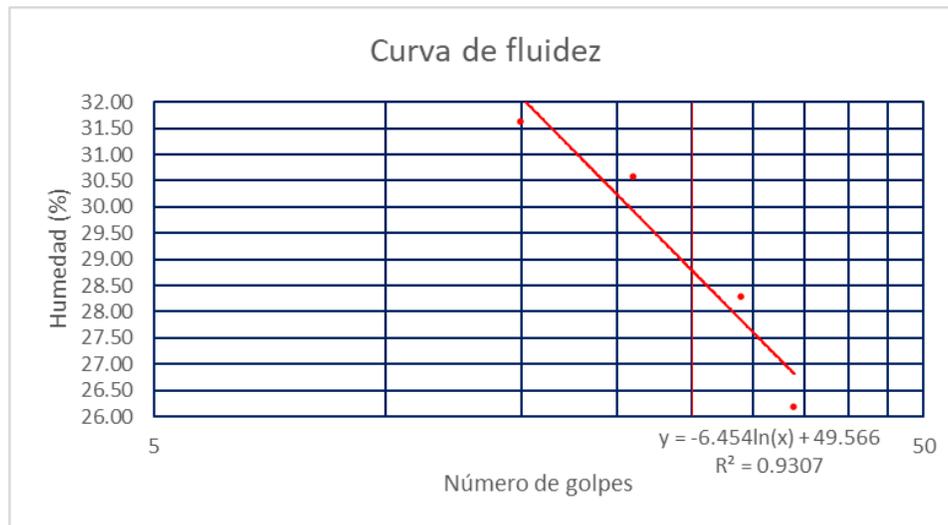
Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### 4.1.10 Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 22

Los resultados del ensayo de límite líquido llevado a cabo en los AR revelaron un valor del 29% para este parámetro.

En la Gráfica 10 se muestra la curva de fluidez obtenida para el material.

Gráfica 10. Curva de fluidez



Fuente: Elaboración propia de la autora.

De acuerdo a la cifra obtenida se revela que el suelo exhibe una plasticidad moderada y una capacidad de deformación bajo ciertas condiciones de humedad y presión. Estas características pueden desencadenar problemas como asentamientos, deformaciones y dificultades en la compactación. En línea con las especificaciones de subbases y bases granulares para carreteras del INVIAS, se establece un límite líquido máximo del 25% para una subbase granular de cualquier tipo (A, B o C); por tanto, un valor de 29% podría indicar que el RCD necesita algún tratamiento o mezcla con otros materiales para cumplir con estas especificaciones y evitar los problemas mencionados. Respecto a las bases granulares, mientras que la especificación para la Clase C establece un límite líquido máximo del 25%, no hay especificaciones definidas para las Clases A y B en cuanto al límite líquido; por lo tanto, un valor de LL del 29% cumple con los requisitos para ser usado en los tipos de tránsito NT1 y NT2.

#### 4.1.11 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E – 126 – 22

El AR al ser sometido al ensayo que permite determinar su límite plástico e índice de plasticidad, arrojó valores correspondientes a 21% y 8% respectivamente. Tal y como se muestra en la Tabla 22, donde se resumen los valores de estos parámetros.

*Tabla 22. Índice de plasticidad (IP)*

<b>LP</b>	<b>21</b>
<b>LL</b>	<b>29</b>
<b>IP</b>	<b>8</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Teniendo como referencia las especificaciones del INVIAS para una subbase granular, donde se establece un límite máximo de índice de plasticidad del 6% para las Clases A, B y C; se define que al obtener un índice de plasticidad del 8%, el material no cumple con los requisitos de ninguna de estas clases. Además, al examinar una base granular, se observa que el índice de plasticidad excede el límite permitido para todas las clases (A, B y C), fijado en un máximo del 3%.

Por tanto, aunque el índice de plasticidad del material se aproxima al límite permitido en ambos casos, es esencial reducir este parámetro para evitar daños durante la construcción donde se utilice el material reciclado. Para lograr este fin, se sugiere considerar el uso de un material de AR con menos componentes que incrementen este valor, tales como el mortero y el ladrillo, pues, en el caso del ladrillo, este puede presentar una absorción de hasta el 17%, lo que ocasiona una retención de agua considerable y, por ende, un aumento en este índice. Otra opción viable es llevar a cabo acciones para estabilizar el material, como su combinación con otro que permita reducir su absorción.

#### 4.1.12 Equivalente de arena de suelos y agregados finos INV E – 133 – 22

Los valores obtenidos de arena presente en la fracción fina del AR, muestran valores mayores al 30%, tal y como se muestra en la Tabla 23, donde se resumen los porcentajes obtenidos en 4 pruebas realizadas y el promedio obtenido correspondiente a un 39%.

Tabla 23. Equivalente de arena

	Lectura C (")	Lectura S (")	EA = LS/LC x 100
Cilindro graduado 1	6,9	2,8	41%
Cilindro graduado 2	6,4	2,6	41%
Cilindro graduado 3	7	2,6	37%
Cilindro graduado 4	8,4	2,8	33%
		<b>Promedio (EA)</b>	<b>39%</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Según este reporte, un valor de equivalente de arena de esta magnitud indica que la muestra contiene una proporción adecuada de partículas finas y materiales deseables, indicando que el material posee una capacidad de drenaje óptima, un comportamiento favorable en actividades de compactación y una baja susceptibilidad a la degradación, debido a la mínima presencia de polvo y finos arcillosos o plásticos nocivos en su composición.

Con un equivalente de arena de 39%, la muestra supera el requisito mínimo establecido del 25% para subbases granulares, según la Tabla 320-2 de las Especificaciones INVIAS. Esto indica que el material cumple con los estándares necesarios en términos de equivalente de arena para ser utilizado en subbases granulares para niveles de tránsito NT1, NT2 y NT3.

Además, este valor también supera el requisito mínimo establecido del 30% para bases granulares, según la Tabla 330-2 de las Especificaciones INVIAS. Esto demuestra que el material cumple con los estándares necesarios en términos de este parámetro de calidad del agregado para ser utilizado en bases granulares en tránsitos de tipo NT1, NT2 y NT3.

#### 4.1.13 Valor de azul de metileno en agregados finos INV E – 235 – 22

El valor de azul de metileno consumido por la muestra tras el ensayo para evaluar este parámetro corresponde a 6,9 g/ml. Lo cual indica que por cada gramo de material de agregado reciclado (AR), se encuentran presentes 6,9 miligramos de arcilla expansiva en la muestra total. Estos datos se detallan en la Tabla 24 y se visualizan en la Ilustración 38, los cuales son indispensables para llegar a esta conclusión.

Tabla 24. Valor de azul de metileno

<b>Masa ensayo (g)</b>	251,8		
<b>Volumen total añadido de la solución de colorante (ml)</b>	175		
	<b>VA</b>	<b>6,9</b>	<b>g/ml</b>
			<b>mg/g</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Ilustración 38. Ensayo de azul de metileno



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Este resultado indica que la cantidad de arcilla presente en el material no lo hace susceptible a deformaciones debido a la alta capacidad de absorción de agua de las arcillas. Además, según los requisitos establecidos por la normativa del INVIAS para bases y subbases, este valor se encuentra dentro de los rangos permisibles para un material granular de estos tipos.

#### **4.1.14 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznableles en los agregados INV E – 211 – 22**

El contenido de terrones de arcilla y partículas deleznableles presentes en el agregado reciclado demuestra que el material no es susceptible a daños derivados de su desintegración por la presencia de agua ante estas condiciones, pues un valor

correspondiente a 1% tanto en la fracción gruesa como en la fracción fina obtenido para este tipo de partículas en relación a toda la muestra, evidencia esta inferencia, tal como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Porcentaje de terrones de arcilla y de partículas deleznales

Tamaño del tamiz		Peso Retenido (g)	Gradación de la muestra original (%)	Masa de las fracciones antes del ensayo (g)	Masa después del ensayo (g)	Masa pasa del tamiz designado (g)	P, % de terrones de arcilla y de partículas deleznales	P, % de terrones de arcilla y de partículas deleznales ponderada (%)
Pasa	Retenido	<b>Ensayo sobre el agregado grueso</b>						
	Mayores a 1 1/2"	2.138,1	14,3	5.035	4.985	50	1,0	0,1
1 1/2"	3/4"	4.718,6	31,5	3.015	2.975	40	1,3	0,4
3/4"	3/8"	5.339,7	35,7	2.010	1.990	20	1,0	0,4
3/8"	No. 4	2.778,2	18,6	1.015	1.005	10	1,0	0,2
Total		14.974,6	100	Sumatoria				<b>1</b>
Pasa	Retenido	<b>Ensayo sobre el agregado fino</b>						
No.4	No. 16	3.172,1	100,0	30	29,8	0,2	0,7	0,7
Total		3.172.1	100,0	Sumatoria				<b>1</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

De acuerdo a valores de aceptación indicados por el INVIAS para este tipo de parámetros, el material es apto para su uso como una subbase granular para cualquier tipo de tránsito, donde el valor exigido se establece en un porcentaje máximo del 2% de contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales en todo el material, caso similar para una base granular donde los requisitos de aceptabilidad son los mismos, por tanto, el material satisface estas condiciones necesarias para su utilización, demostrando su calidad y potencial de uso en actividades de pavimentación.

#### 4.1.15 Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras INV E – 230 – 22

Al analizar los resultados del índice de aplanamiento por fracción, como se detallan en la Tabla 26, se observa una variación en los grados de aplanamiento entre las diferentes fracciones. Por ejemplo, las fracciones que pasan a través del tamiz de 3/8" y se retienen en el de 1/4" exhiben un índice de aplanamiento del 59,6%, lo que indica una notable presencia de partículas planas en esta fracción específica. Sin embargo, al considerar el índice de aplanamiento global, que integra los índices de aplanamiento de todas las fracciones, se obtiene un valor del 18%. Cifra que, en términos generales, sugiere que la muestra posee un grado moderado de aplanamiento.

Es crucial tener en cuenta que un índice de aplanamiento más elevado puede influir negativamente en la capacidad de compactación y en la resistencia del material en aplicaciones de construcción. En este contexto, los resultados del AR indican características adecuadas en relación con este parámetro.

Tabla 26. Índice de aplanamiento

Tamices		Masa inicial de cada fracción (Ri) (g)	Granulometría fracción entre tamices (%)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos del 5% del total) (%)	Masa de las partículas planas (mi) (g)	Índice de aplanamiento por fracción (mi / Ri)×100
Pasa	Retiene					
2 1/2"	2"	2.760	6,7		730	26,4
2"	1 1/2"	4.150	10,1		730	17,6
1 1/2"	1"	8.090	19,7		1.295	16,0
1"	3/4"	10.200	24,8		935	9,2
3/4"	1/2"	8.035	19,6		815	10,1
1/2"	3/8"	3.780	9,2		365	9,7
3/8"	1/4"	4.036	9,8		2.408	59,6
Totales	M1	41.051.1	100,0		7.277,5	-
					M3	
					IA18	

Fuente: Elaboración propia de la autora.

En cuanto al índice de alargamiento obtenido, se puede apreciar en la Tabla 27 que las distintas fracciones exhiben niveles variables de alargamiento. Por ejemplo, las partículas que atraviesan el tamiz de 1" y son retenidas en el de 3/4" muestran un índice de alargamiento del 18,6%, mientras que aquellas que pasan por el tamiz de 3/4" y se retienen en el de 1/2" tienen un índice de alargamiento del 24,9%. Al considerar el índice de alargamiento global, que integra los índices de alargamiento de todas las fracciones, se obtiene un valor del 18%. Este valor sugiere que, en líneas generales, la muestra presenta un nivel moderado de alargamiento, lo cual indica un comportamiento satisfactorio del agregado en términos de compactación y su capacidad para resistir cargas sin sufrir deformaciones bruscas.

Tabla 27. Índice de alargamiento

Tamices		Masa inicial de cada fracción (Ri) (g)	Granulometría fracción entre tamices (%)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos del 5% del total) (%)	Masa de las partículas alargadas (ni) (g)	Índice de alargamiento por fracción (ni / Ri)×100
Pasa	Retiene					
2 1/2"	2"	-	-		-	-
2"	1 1/2"	4.150	10,8		365	8,8
1 1/2"	1"	8.090	21,1		1.315	16,3
1"	3/4"	10.200	26,6		1.900	18,6
3/4"	1/2"	8.035	21,0		2.000	24,9
1/2"	3/8"	3.780	9,9		750	19,8
3/8"	1/4"	4.036	10,5		460	11,4
Totales	M11	38.291,1	100,0		6.790,3	-
					M13	
					IL18	

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Según las especificaciones del INVIAS para subbases granulares, detalladas en la Tabla 320-2 de la normativa correspondiente, no se establecen valores máximos para los índices de alargamiento y aplanamiento en este tipo de material. Esta omisión sugiere que dichos índices no se consideran como criterios de calidad para este tipo de agregados según la normativa vigente. Por lo tanto, bajo este criterio, se respalda la aplicabilidad de este tipo de agregado en subbases granulares.

Por otra parte, de acuerdo con la Tabla 330-2, que regula la calidad de los agregados destinados al uso en base granular según las normas del INVIAS, se establece que un valor del 18% tanto en el índice de alargamiento como en el de aplanamiento indica que el material es adecuado para su uso en este tipo de aplicación. Según la normativa, este valor no debe exceder el límite máximo del 35% tanto en el aplanamiento como en el alargamiento, lo que lo califica para su aplicación y uso en pavimentos destinados a los tipos de tránsito NT1, NT2 y NT3.

#### 4.1.16 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E – 227 – 22

Tras someter los agregados reciclados a un análisis visual para evaluar la presencia de caras fracturadas en sus partículas gruesas, se han registrado los porcentajes correspondientes a una y dos caras fracturadas en cada partícula, que se detallan en la Tabla 28.

*Tabla 28. Porcentaje de caras fracturadas*

FRACCIÓN TAMICES		1 Cara			2 Caras			P, % de partículas con 1 cara fracturada	P, % de partículas con 2 caras fracturadas
		Masa (g)	F (g)	N (g)	F (g)	N (g)			
1 1/2"	3/8"	6.730	6.550	180	5.390	1340	97	80	
3/8"	N4	870	821,3	48,7	777,4	92,6	94	89	
SUMATORIA		7.600	7.371,3	228,7	6.167,4	1.432,6	97	81	

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Donde:

P: Porcentaje de partículas con el número especificado de caras Fracturadas;

F: Masa o número de partículas fracturadas con, al menos, el número de caras fracturadas especificado;

N: Masa o número de partículas en la categoría de no fracturadas que no cumplen el criterio de partículas fracturadas.

Se puede notar que el porcentaje correspondiente a un 97% de partículas con una cara fracturada cumple con las especificaciones estipuladas en la norma INVIAS como necesarios para la empleabilidad del material en actividades de pavimentación en la capa de subbase y base granular para cualquiera de los tipos de tránsito, ya sea nivel 1, 2 o 3. Caso similar para un 81% de partículas con dos caras fracturadas, donde este valor no es requerido para una subbase granular, pero si para una base, donde el material cumple a cabalidad con el porcentaje requerido para un nivel de tránsito 1 en el cual este parámetro no se exige, para un nivel de tránsito 2 (>50%) y en el caso de un nivel de tránsito 3, el material no cumple, puesto que la exigencia se posiciona en un valor un tanto mayor (>85%). Teniendo en cuenta que la forma y geometría de las partículas influye en la estabilidad mecánica de las partículas y que es deseable que se presenten partículas angulosas y rugosas que generen una vida útil apropiada al pavimento, se puede asegurar que los AR son ideales en cuanto a este indicador. Además, es importante reconocer que el AR proviene de un proceso de trituración, lo que implica que la gran mayoría de las partículas probablemente presenten caras fracturadas como resultado de dicha fragmentación. Por lo tanto, al evaluar las caras fracturadas en el AR, es crucial considerar la naturaleza inherente del material y cómo este proceso de producción puede influir en los resultados del ensayo; es así, como se recomienda una evaluación cuidadosa y una consideración adecuada de la producción del material para obtener resultados precisos y homogéneos tales como los presentados.

#### **4.1.17 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (Influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (Angularidad de la fracción fina) INV E – 239 – 22**

El valor promedio obtenido para el ensayo de determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados presentes en el material AR tras hacerlos con 3 muestras del mismo, corresponde a un valor de 45,4%, tal y como se muestra en la Tabla 29.

*Tabla 29. Porcentaje de vacíos de la fracción fina*

<b>Porcentaje de vacíos del agregado fino</b>	
U1	45,4
U2	45,4
U3	45,4
<b>Us</b>	<b>45,4</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Los resultados obtenidos muestran que casi la mitad del volumen de la muestra consiste en espacios vacíos o porosidad.

De acuerdo con el Artículo 320-22 de la normativa del INVIAS, que detalla los estándares de calidad para la subbase granular destinada a pavimentación, se observa que no se especifica un porcentaje mínimo de angularidad para la fracción fina de los agregados. En consecuencia, el agregado de AR cumple con los criterios establecidos para su aplicación en pavimentación según este criterio.

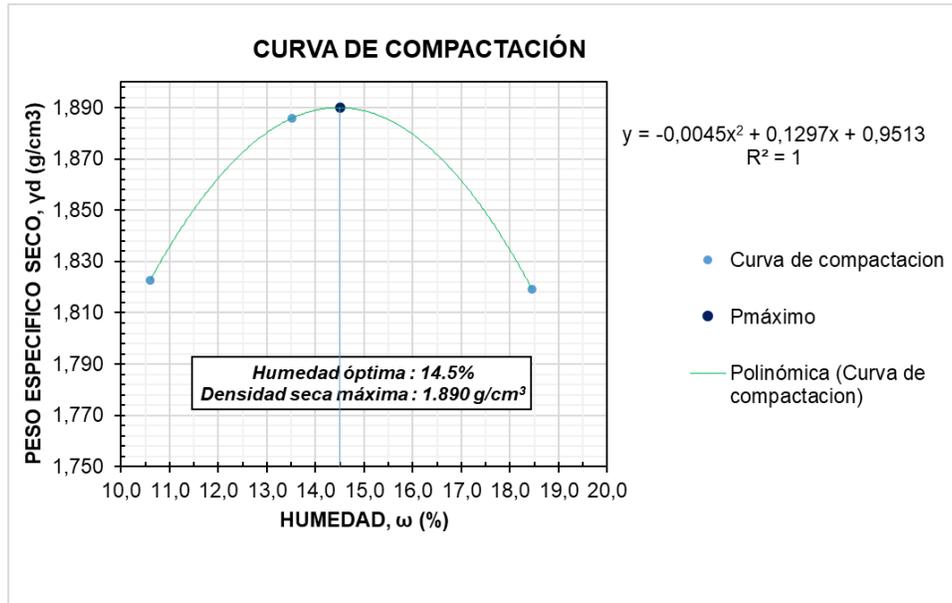
Asimismo, según la Tabla 330-22 de las Especificaciones INVIAS, que establece los requisitos de los agregados para bases granulares, se prescribe un porcentaje mínimo de angularidad para la fracción fina de los agregados del 35% para las clases A (NT3) y B (NT2); sin embargo, no se especifica ningún requisito para la clase C (NT1). En el estudio realizado, se ha obtenido un porcentaje del 45,4%, superando así el umbral mínimo establecido para las clases A y B. Por lo tanto, este resultado indica que el AR cumple con sus especificaciones de angularidad requeridas.

Estos hallazgos respaldan la idoneidad del AR para ser empleado en subbases y bases granulares, dado que cumple con los requisitos mínimos de angularidad establecidos para estos materiales. Este resultado evidencia que el AR posee una mayor angulosidad, menor esfericidad y una textura de superficie áspera, lo que se traduce en una óptima capacidad de drenaje, compactación, estabilidad y durabilidad una vez aplicado en obra.

#### **4.1.18 Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 22**

Posterior al proceso de determinación de los porcentajes de humedad y grados de compactación que generan distintas densidades en el material de residuos de construcción y demolición se obtuvieron los resultados que se muestran en la Gráfica 11, donde se puede determinar entonces, que la humedad óptima para alcanzar la máxima densidad seca del material corresponde a un porcentaje del 14,5%; además, se registra una densidad seca máxima de 1,890 g/cm<sup>3</sup>, que indica la máxima densidad alcanzada por el material durante el proceso de compactación.

Gráfica 11. Curva de compactación AR



Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### 4.1.19 CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV E – 148 – 22

De acuerdo al procedimiento realizado para evaluar la resistencia del material proveniente de residuos de construcción y demolición con respecto a la de un suelo patrón de características ideales, se recopila la información relacionada con dicha capacidad para 3 tipos de muestras a las cuales se les realizó el ensayo de CBR empleando la humedad óptima que genera la densidad máxima del material, tal como se muestra en la Tabla 30.

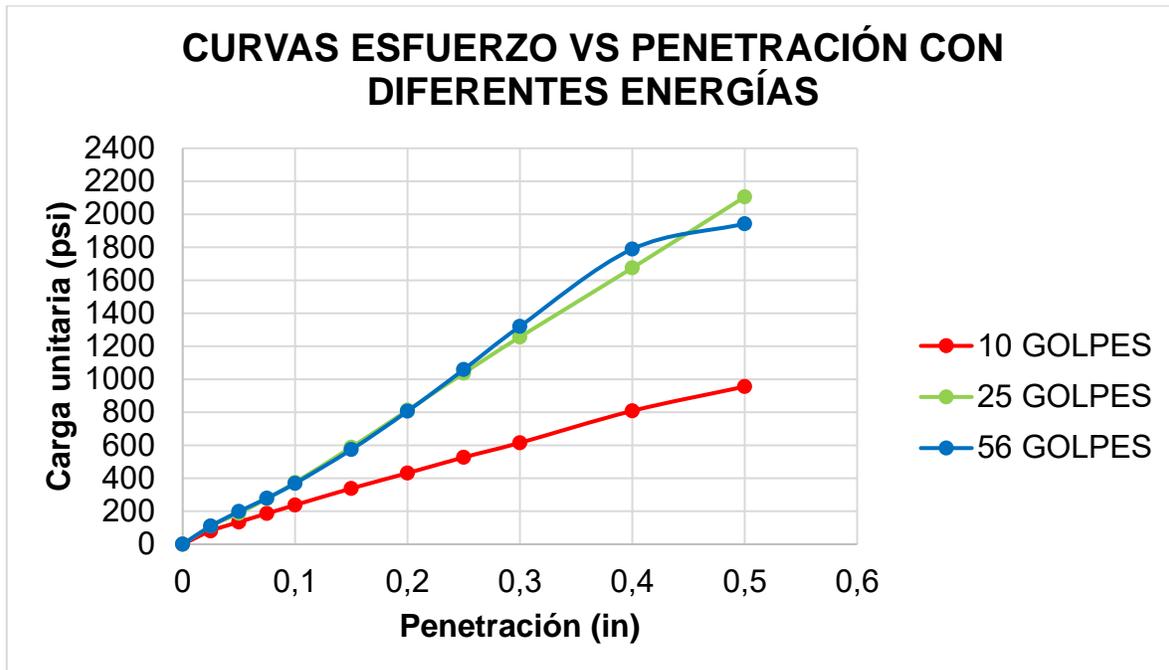
Tabla 30. CBR de AR

RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO (CBR LABORATORIO PARA AR)									
<b>Molde No.</b>	28			42			26		
<b>No. Golpes</b>	10			25			56		
<b>Días inmersión</b>	1			1			1		
<b>Expansión (%)</b>	0,04			0			0		
<b>Penetración (in)</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	-	<b>0</b>	-	-	<b>0</b>	-	-
<b>0,025</b>	33	80,85		109,87			155,79		
<b>0,05</b>	55	134,75		187,81			198,78		
<b>0,075</b>	76	186,2		277,00			279,00		
<b>0,1</b>	97	237,65	24%	374,91	37%	368,89	37%		
<b>0,15</b>	138	338,1	-	588,04	-	573,75	-		
<b>0,2</b>	176	431,2	29%	812,29	54%	806,35	54%		
<b>0,25</b>	215	526,75	-	1.037,13	-	1.058,97	-		
<b>0,3</b>	251	614,95	32%	1.256,35	66%	1.320,35	69%		
<b>0,4</b>	330	808,5	35%	1.674,91	73%	1.789,35	78%		
<b>0,5</b>	390	955,5	37%	2.105,42	81%	1.942,86	75%		
<b>%W Penetración</b>	13,8			13,0			12,8		
<b>Constante anillo (psi)</b>	2,45								

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Además, la Gráfica 12, muestra la relación que existe para cada una de las energías de compactación entre la carga necesaria para producir en el suelo diferentes penetraciones.

Gráfica 12. Curvas esfuerzo vs Penetración de AR para CBR (10, 25 y 56 golpes)



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Es así, como se puede evidenciar que el RCD bajo distintos niveles de compactación presenta comportamientos distintos. A 10 golpes, el CBR es de 24% a 0,1", 29% a 0,2", 35% a 0,4" y 37% a 0,5". A 25 golpes, el CBR incrementa significativamente a 37% a 0,1", 54% a 0,2", 73% a 0,4" y 81% a 0,5". A 56 golpes, el CBR se mantiene en 37% a 0,1", se mantiene en 54% a 0,2", aumenta a un 78% a 0,4" y disminuye a un 75% a 0,5".

Comparando los resultados del material bajo un alto nivel de compactación (100% de la energía de PM) con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022, donde los requisitos de %CBR para subbases granulares según la Tabla 320-2 son 40% para Clase A y 30% para Clase B y C y para bases granulares según la Tabla 330-2, se requiere un %CBR mayor o igual al 95% para Clase A y mayor o igual al 80% para Clase B y C. Los datos indican que el material cumple con los requisitos para subbases granulares, mientras que para bases granulares cumple con los requisitos para Clase B y C, pero no para Clase A.

Además, al determinar el valor de CBR al 95% de la energía de Proctor Modificado, que es el mínimo nivel de compactación que se exige para los suelos, en distintas deformaciones tales como 0,1", 0,2", 0,4 y 0,5 y asemejando la prueba a condiciones

más realistas, se encuentra que dicho valor corresponde a 33%, 44%, 58% y 65% respectivamente. Evidenciando así que el material al ser compactado con esta energía, podría emplearse para su uso en subbases granulares de cualquier tipo, más no para una base granular según los requerimientos de la norma INVIAS.

En general, mediante este ensayo se demuestran las propiedades de resistencia de los AR, a pesar de tratarse de un material reciclado. Los resultados obtenidos validan su eficacia para la pavimentación y demuestran que ante una correcta compactación que permita alcanzar el nivel de compactación adecuado para el suelo, estos llegan a comportarse de una manera eficaz ofreciendo una resistencia óptima, estabilidad y durabilidad representadas por mejoras en las propiedades del suelo, además de que se posicionan en un rango de valores de CBR similares o mayores que algunos materiales granulares naturales. Se sugiere que aquellos casos específicos, donde el material no cumple con las especificaciones, podrían mejorarse mediante la adición de material granular natural de aporte.

#### **4.1.20 CBR modificado a 4 y 28 días de curado para una subbase granular**

Posterior al proceso de evaluación del crecimiento de la resistencia de los AR usados como una subbase granular por medio del ensayo de CBR, al estar en curado durante 4 y 28 días respectivamente, se encontraron los resultados que se reportan a continuación, de manera similar a los datos necesarios para llevar a cabo dicha evaluación.

##### **4.1.20.1 Granulometría de AR como una subbase granular**

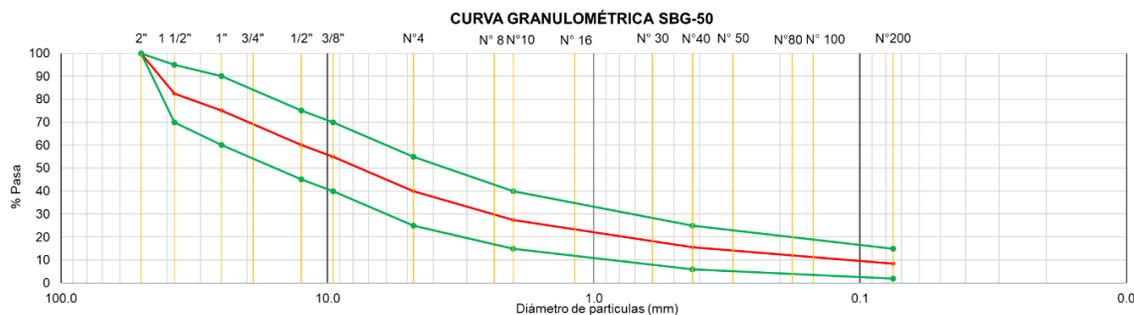
Para llevar a cabo el ensayo de CBR correspondiente, fue esencial obtener la granulometría de una SBG-50 que estableciera al material en dicha clasificación, esto se logró mediante un análisis granulométrico que permitió establecer la distribución de tamaños de partículas del agregado, como se detalla en la Tabla 31 y en la curva de la Gráfica 13, para una muestra de 6000 gramos.

Tabla 31. Cálculo de cantidades para espécimen de 6000 g para granulometría de AR como SBG-50

No. Tamiz	Tamiz (mm)	%Pasa		% Pasa Promedio	% Retenido	% Retenido Acumulado	Cálculo por espécimen de (6000g)
		Límite Inferior	Límite superior				
2"	50,0	100	100	100	0	0,0	0
1 1/2"	37,5	70	95	83	18	17,5	1.050
1"	25,0	60	90	75	8	25,0	450
1/2"	12,5	45	75	60	15	40,0	900
3/8"	9,5	40	70	55	5	45,0	300
No. 4	4,75	25	55	40	15	60,0	900
No. 10	2,00	15	40	28	13	72,5	750
No. 40	0,425	6	25	16	12	84,5	720
No. 200	0,075	2	15	8,5	7	91,5	420
Pasa 200	-	-	-	-	8,5	100,0	510
Total					100		6.000

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 13. Curva granulométrica AR como SBG-50



Fuente: Elaboración propia de la autora.

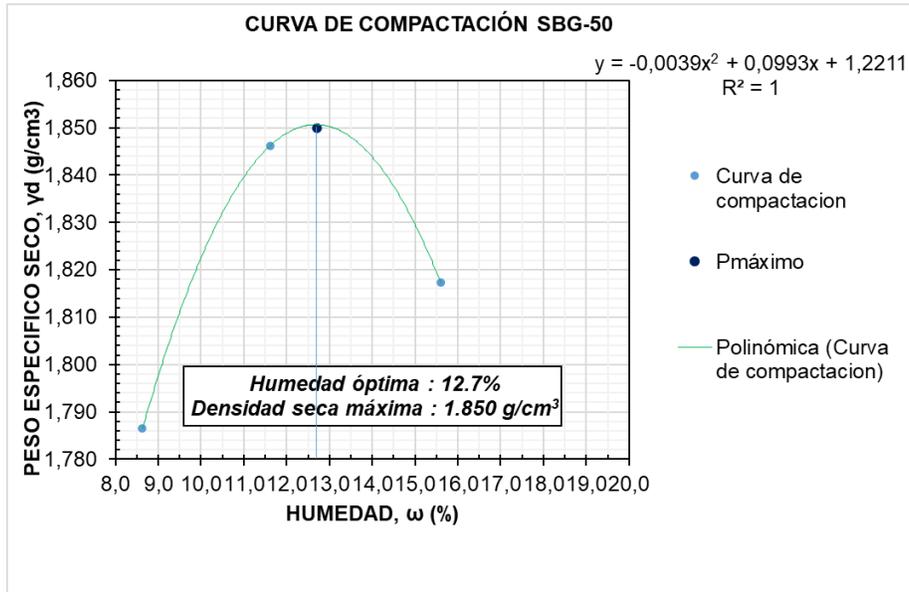
Es así como se define que, para preparar un espécimen de masa seca de 6.000 g, es necesario adherirse a una distribución granulométrica precisa para satisfacer los requisitos de gradación de una subbase granular 50 que además sirvan para el ensayo de proctor modificado, estableciendo pesos retenidos específicos para cada tamaño de tamiz. Siguiendo estas directrices, se deben retener los siguientes pesos en cada tamiz: para el tamiz de 1 1/2" (37,5mm), se retienen 1.050 gramos; para el tamiz de 1" (25,0 mm), se retienen 450 gramos; para el tamiz de 1/2" (12,5 mm), se retienen 900 gramos; para el tamiz de 3/8" (9,5 mm), se retienen 300 gramos; para

el tamiz No. 4 (4,75 mm), se retienen 900 gramos; para el tamiz No. 10 (2,00 mm), se retienen 750 gramos; para el tamiz No. 40 (0,425 mm), se retienen 720 gramos; para el tamiz No. 200 (0,075 mm), se retienen 420 gramos; y para el pasa 200, se retienen 510 gramos. Estos pesos o sus debidas correlaciones garantizan una distribución adecuada de partículas en el espécimen, de acuerdo con las normas prescritas para una subbase granular 50, lo que facilita la ejecución del ensayo de Proctor modificado. Es importante mencionar que para la formación de esta granulometría se debe hacer con el material seco al horno para asegurar que las partículas adheridas por humedad estén correctamente distribuidas en su tamiz correspondiente; además, las fracciones finas y gruesas no deben lavarse, ya que este proceso podría resultar en la pérdida de cantidades significativas de los materiales aglutinantes que componen el AR.

#### **4.1.20.2 Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 22 para el AR como SBG – 50**

De acuerdo a los resultados del ensayo de Proctor Modificado donde se establece la humedad óptima a la que el suelo presentará su densidad máxima, se establecieron valores para el AR usado como subbase granular en tal caso, que se muestran en la Gráfica 14; donde se determinó que la humedad óptima para lograr la máxima densidad seca del material usado como una SBG-50 es del 12,7%. Este valor representa la cantidad de humedad que resulta en la mejor compactación del material, lo que es crucial para garantizar su estabilidad y resistencia estructural. Además, se registró una densidad seca máxima de 1,850 g/cm<sup>3</sup>, que indica la máxima densidad alcanzada por el material durante el proceso de compactación.

Gráfica 14. Curva de compactación AR como SBG-50



Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### 4.1.20.3 CBR modificado a 4 días de curado para una subbase granular

Tras haber realizado el ensayo de proctor modificado y elaborar especímenes con la humedad y densidad óptima, dejar el material de residuos de construcción y demolición durante 4 días en inmersión para la medición de su resistencia respecto a un suelo patrón y poder comparar estos resultados con otros periodos de tiempo, se obtuvo la información que se resume en la Tabla 32, donde se evidencia que el AR bajo distintos niveles de compactación presenta comportamientos distintos. A 10 golpes, el CBR es de 32% a 0,1", 38% a 0,2", 46% a 0,4" y 48% a 0,5". A 25 golpes, el CBR se posicionó en 26% a 0,1", aumentó a 39% a 0,2", al igual que se generó un incremento hasta el 59% a 0,4" y aumentó considerablemente hasta 71% a 0,5". A 56 golpes, el CBR aumentó hasta un 63% a 0,1", casos semejantes a los porcentajes obtenidos de 85% a 0,2", 81% a 0,4" y 88% a 0,5".

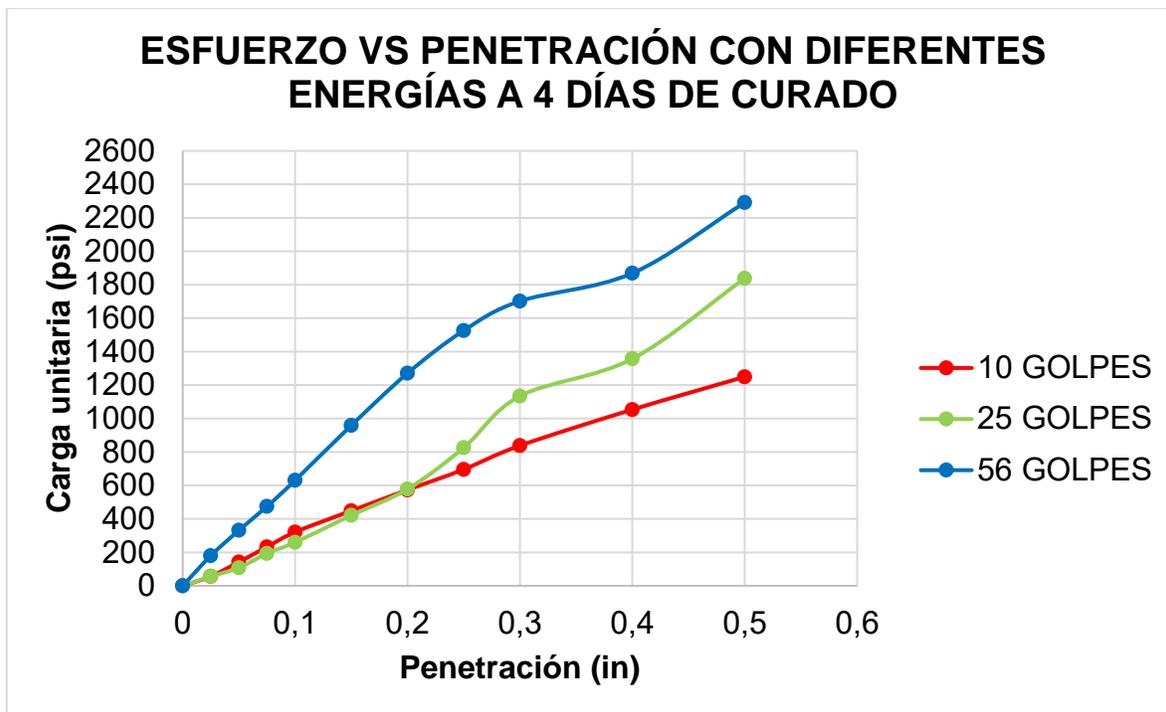
Tabla 32. CBR de AR como SBG-50 a 4 días de curado

Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR laboratorio) usando esfuerzos corregidos									
<b>Molde No.</b>	29			15			19		
<b>No. Golpes</b>	10			25			56		
<b>Días inmersión</b>	4			4			4		
<b>Expansión (%)</b>	0,17			0,20			0,17		
<b>Penetración (in)</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	-	<b>0</b>	<b>0</b>	-		<b>0</b>	-
<b>0.025</b>	23	56,35		23	56,35			208,92	
<b>0.05</b>	58	142,1		44	107,80			332,07	
<b>0.075</b>	95	232,75		79	193,55			474,44	
<b>0.1</b>	131	320,95	32%	106	259,70	26%		630,42	63%
<b>0.15</b>	183	448,35	-	172	421,40	-		959,09	-
<b>0.2</b>	234	573,3	38%	236	578,20	39%		1.270,71	85%
<b>0.25</b>	284	695,8	-	337	825,65	-		1.525,70	-
<b>0.3</b>	342	837,9	44%	463	1.134,35	60%		1.701,67	90%
<b>0.4</b>	430	1.053,5	46%	554	1.357,30	59%		1.868,80	81%
<b>0.5</b>	510	1.249,5	48%	750	1.837,50	71%		2.291,05	88%
<b>%W penetración</b>	13,7			15,0			12,3		
<b>Constante anillo (psi)</b>	2,45								

Fuente: Elaboración propia de la autora.

La Gráfica 15 ilustra este comportamiento entre la relación de la carga requerida para lograr diferentes profundidades de penetración en el suelo, según distintos niveles de energía de compactación.

Gráfica 15. Curvas esfuerzo vs Penetración de AR como SBG-50 para CBR a 4 días de curado (10, 25 y 56 golpes)



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Comparando los resultados del material bajo un alto nivel de compactación (100% de la energía de PM) con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022, donde los requisitos de %CBR para subbases granulares según la Tabla 320-2 son 40% para Clase A y 30% para Clase B y C y para bases granulares según la Tabla 330-2, se requiere un %CBR mayor o igual al 95% para Clase A y mayor o igual al 80% para Clase B y C; los datos indican que, el material es adecuado para ser usado como una subbase granular para cualquier nivel de tránsito y como una base granular que esté sometida a esfuerzos de tránsito nivel tipo 1 o 2.

Además, al determinar el valor de CBR al 95% de la energía de Proctor Modificado, que es el mínimo nivel de compactación que se exige para los suelos en distintas deformaciones tales como 0,1", 0,2", 0,4 y 0,5, se encuentra que dicho valor corresponde a 27%, 39%, 60% y 71% respectivamente, evidenciando así que el material al ser compactado con esta energía, podría emplearse para su uso en subbases granulares de cualquier tipo, más no para una base granular según los requerimientos de la norma INVIAS.

En general, mediante este ensayo se demuestran las propiedades de reactivación de materiales que poseen dicha característica en el AR, representado por el incremento de su valor de CBR al someterlo a condiciones que generan ambientes húmedos, en relación con los resultados obtenidos para el mismo caso, pero sin estos efectos. Esta propiedad puede también llegar a derivarse en un incremento del módulo resiliente del material al transcurrir periodos prolongados de tiempo donde los componentes generen su proceso de reactivación y se derive en una mayor resistencia y rigidez del material y por tanto de la estructura de pavimento, pensando en esa aplicación.

#### 4.1.20.4 CBR modificado a 28 días de curado para una subbase granular

Tras dejar el material de residuos de construcción y demolición durante 24 días en cámara húmeda y 4 días en inmersión para la medición de su resistencia respecto a la de un suelo patrón y poder comparar estos resultados con otros periodos de tiempo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 33, donde se evidencia que el RCD bajo distintos niveles de compactación presenta comportamientos diferentes. A 10 golpes, el CBR es de 37% a 0,1", 48% a 0,2", 59% a 0,4" y 64% a 0,5". A 25 golpes, el CBR se posicionó en 37% a 0,1", aumentó a 59% a 0,2", al igual que se generó un incremento hasta el 92% a 0,4" y aumentó considerablemente hasta 71% a 0,5". A 56 golpes, el CBR aumentó hasta un 50% a 0,1", casos semejantes a los porcentajes obtenidos de 87% a 0,2", 128% a 0,4" y 145% a 0,5".

Tabla 33. CBR de AR como SBG-50 a 28 días de curado

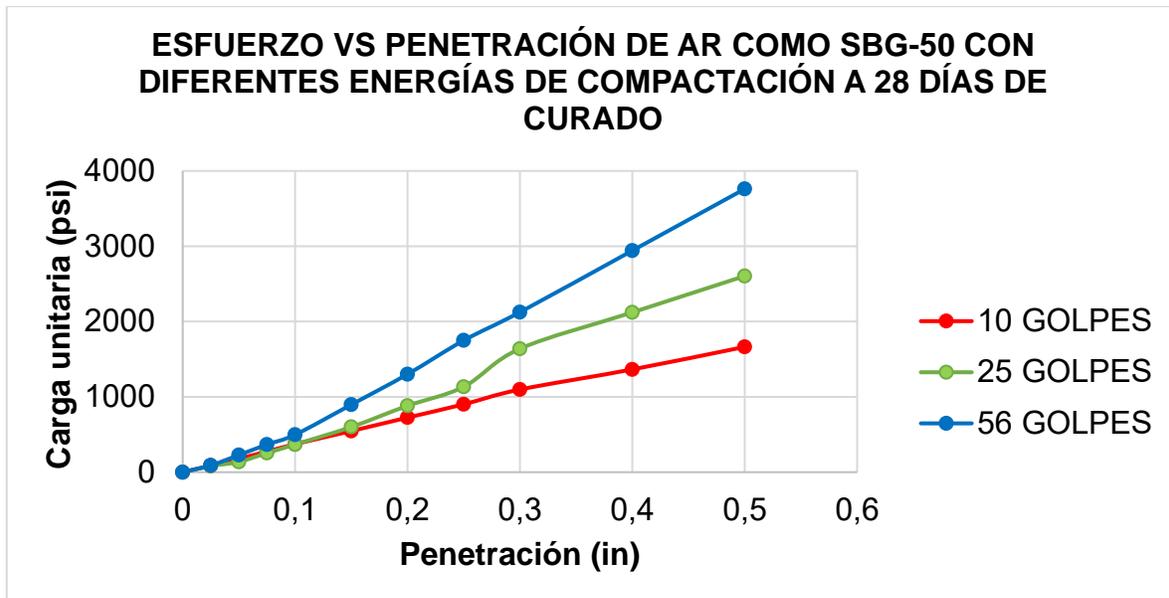
Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR laboratorio)									
<b>Molde No.</b>	28			2			35		
<b>No. Golpes</b>	10			25			56		
<b>Días inmersión</b>	4			4			4		
<b>Expansión (%)</b>	0,13			0,13			0,13		
<b>Penetración (in)</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>
<b>0</b>	0	0	-	0	0	-	0	0	-
<b>0,025</b>	36	88,2	-	33	80,85	-	37	90,65	-

<b>0,05</b>	73	178,85		56	137,2		93	227,85	
<b>0,075</b>	112	274,4		104	254,8		150	367,5	
<b>0,1</b>	152	372,4	37%	150	367,5	37%	203	497,35	50%
<b>0,15</b>	223	546,35	-	245	600,25	-	366	896,7	-
<b>0,2</b>	296	725,2	48%	360	882	59%	531	1.300,9 5	87%
<b>0,25</b>	368	901,6	-	463	1.134,3 5	-	714	1.749,3	-
<b>0,3</b>	448	1.097,6	58%	669	1.639,0 5	86%	867	2.124,1 5	112 %
<b>0,4</b>	557	1.364,6 5	59%	866	2.121,7	92%	1.201	2.942,4 5	128 %
<b>0,5</b>	679	1.663,5 5	64%	1063	2.604,3 5	100%	1.535	3.760,7 5	145 %
<b>%W penetración</b>	14,3			13,2			14,1		
<b>Constante anillo (psi)</b>	2,45								
<b>Nota:</b>	<b>* Curado en Cámara Húmeda: 24 días* Peso de sobrecargas: 4,54 kg (10lb)</b>								

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Asimismo, la Gráfica 16 muestra cómo varía la carga necesaria para alcanzar diversas profundidades de penetración en el suelo, dependiendo de los diferentes niveles de energía de compactación usados en la prueba.

Gráfica 16. Curvas esfuerzo vs Penetración de AR como SBG-50 para CBR a 28 días de curado (10, 25 y 56 golpes)



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Comparando los resultados del material bajo un alto nivel de compactación (100% de la energía de PM) con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2022, donde los requisitos de %CBR para subbases granulares según la Tabla 320-2 son 40% para Clase A y 30% para Clase B y C y para bases granulares según la Tabla 330-2, se requiere un %CBR mayor o igual al 95% para Clase A y mayor o igual al 80% para Clase B y C; los datos indican que, el material es adecuado para ser usado como una subbase granular para cualquier nivel de tránsito y como una base granular que esté sometida a esfuerzos de tránsito nivel tipo 1 o 2.

Además, al determinar el valor de CBR al 95% de la energía de Proctor Modificado, que es el mínimo nivel de compactación que se exige para los suelos en distintas deformaciones tales como 0.1", 0.2", 0.4" y 0.5", se encuentra que dicho valor corresponde a 37%, 60%, 93% y 102% respectivamente, evidenciando así que el material al ser compactado con esta energía, podría emplearse para su uso en subbases granulares de cualquier tipo, más no para una base granular según los requerimientos de la norma INVIAS.

Este ensayo demuestra las propiedades de reactivación de materiales presentes en el AR, evidenciado por el aumento del valor del CBR al someter el material a

condiciones húmedas, en comparación con los resultados obtenidos en condiciones secas y a 4 días de inmersión. Esta propiedad puede conducir también a un aumento del módulo resiliente del material a medida que transcurren períodos prolongados, creando así una mayor resistencia del material y, por ende, de la estructura del pavimento, en aplicación de este concepto.

#### **4.1.20.5 Crecimiento del CBR del AR en distintos periodos de tiempo**

El crecimiento del CBR del AR usado como una subbase granular 50 tras 0, 4 y 28 días de curado es evidente, tal comportamiento se muestra en la Tabla 34, al igual que en la Gráfica 17, que muestran el CBR del material evaluado al 95% de la energía de compactación del ensayo de proctor modificado a diferentes penetraciones, dado que este es el grado de compactación regularmente usado para este tipo de material.

En el ensayo se encontró que para producir una deformación de 0,1" y 0,2" que son los valores a los que normalmente se evalúan los materiales en este ensayo, el valor de CBR después de 4 días de curado disminuye, pero al transcurrir 28 días de en esta condición, este aumenta para ambos casos, donde es posible que la razón de este comportamiento se relacione con el paso de las partículas de agua usadas en la compactación desde los macroporos hasta los microporos del material, creando una reducción en la resistencia del mismo, que se eleva nuevamente al culminar esta fase como se puede observar en los porcentajes reportados. En el primer caso, para las cifras obtenidas a la deformación correspondiente a 0,1", donde se encontraron valores de CBR del 33% en el día 0, en el que el agregado no se sometió a curado, a diferencia del valor encontrado a 4 días de curado posicionado en un 27% de CBR, demostrando la disminución de la resistencia del material ya mencionada en un 82%, caso contrario a lo que sucedió en el día 28 donde se obtuvo un valor de CBR del 37%, es decir en un aumento de la resistencia del 12% con respecto a la reportada cuando se inició con la realización de esta medición. Una tendencia similar ocurre al evaluar este fenómeno para una penetración de 0,2", donde en los 4 días iniciales de la evaluación se muestra que el porcentaje de CBR se ubica en 39%, evidenciando una disminución en la resistencia del material, respecto al valor obtenido en el día 0, correspondiente a 44% de CBR, esto resulta en una disminución del 11,36% pero que diverge del aumento de la misma a los 28 días de curado, donde este porcentaje de incremento corresponde a un 36% dado el CBR de 60%

Por otro lado, al observar el valor del CBR a 0,4" y 0,5" de penetración, consideradas en esta medición, teniendo en cuenta que los agregados reciclados al estar en

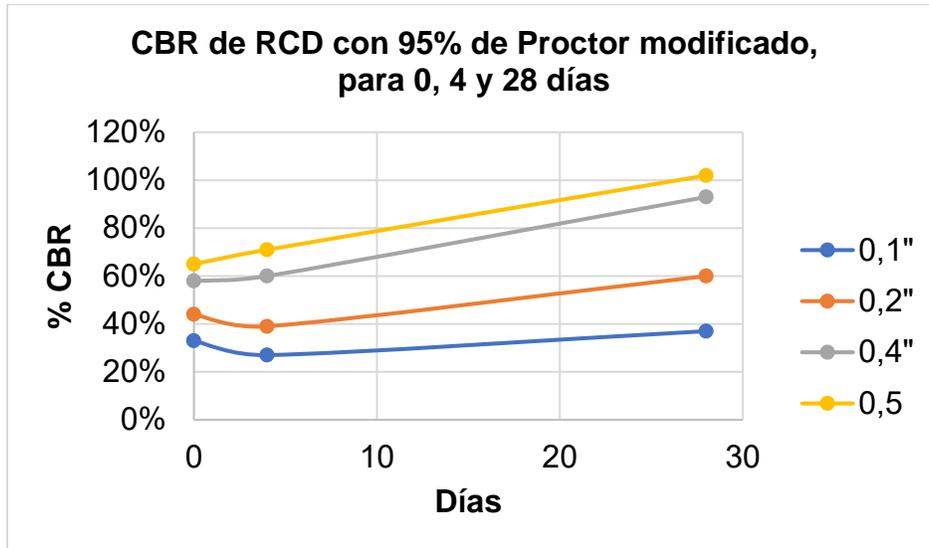
contacto con agua y transcurrir ciertos periodos de tiempo, crean una unión inicial entre ellos, propia por sus características de cementación, como se describe en la literatura, y que se pretende hayan sido sobrepasadas al realizar la medición a esta profundidad, se encontró un comportamiento en el que la resistencia del material aumenta a medida que avanzan los periodos de curado. Específicamente, al evaluar la presión necesaria para causar en el material una deformación de 0,4" se muestra que este en el día 0 presenta un CBR del 58%, al transcurrir un periodo de 4 días de curado, tal valor corresponde a 60%, lo cual demuestra un aumento de la resistencia del 3%, caso similar de la evolución de este comportamiento ocurrida hasta el día 28, donde el CBR reportado tuvo una cifra del 93% lo cual posiciona a tal crecimiento en un incremento del 60% con respecto al obtenido inicialmente. Además, los valores del ensayo de CBR evaluado a 0,5" de penetración también demuestran que el material incrementa su capacidad resistiva al someterse a distintos periodos de curado, se tiene que en el día 0, el valor de CBR asociado para medir dicha capacidad se ubica en 65%, al transcurrir 4 días de curado, el valor es 71%, mostrando un aumento del 9% de la resistencia, tendencia creciente que se mantiene hasta la medición final de esta capacidad en el día 28, donde se obtuvo un valor de CBR correspondiente al 102% para un incremento del 57% en relación al porcentaje medido en primera instancia.

*Tabla 34. CBR de AR como SBG-50 con 95% de Proctor modificado, para 0, 4 y 28 días de curado*

Días	Penetración			
	0,1"	0,2"	0,4"	0,5"
0	33%	44%	58%	65%
4 (0 días en cámara húmeda y 4 días en inmersión)	27%	39%	60%	71%
28 (24 días en cámara húmeda y 4 días en inmersión)	37%	60%	93%	102%

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 17. CBR de AR como SBG-50 con 95% de Proctor modificado, para 0, 4 y 28 días de curado



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Es importante mencionar que particularmente, la medición considerada de este parámetro a 0,4" y 0,5" que no es tan usual para materiales granulares y cuya justificación de aplicación en este caso se expuso previamente, quedó descartada, ya que el material siempre aumento su resistencia, y no demostró una resistencia mayor inicialmente que se esperaba por la unión de sus partículas susceptibles a fracturarse después de las penetraciones iniciales y que permitiera realizar la medición ante condiciones más exigentes y realistas, es por ello que, considerando valores más conservadores y usados de manera regular, se recomienda usar los valores obtenidos a 0,1" y 0,2" cada que se requiera evaluar este tipo de fenómenos.

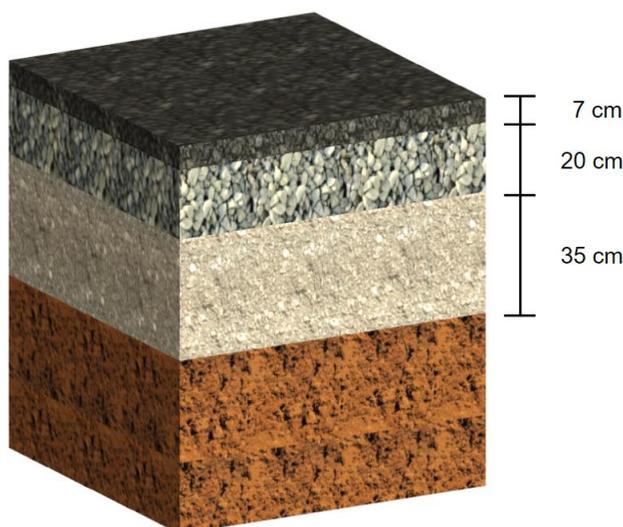
Estos resultados son de gran importancia, pues, a pesar de que el ensayo de CBR compara el suelo con un suelo patrón de características ideales y que no presenta la misma composición que los RCD, este ensayo se hace netamente para medir el aumento de la resistencia del material en el tiempo, permitiendo entonces así corroborar dicha hipótesis, lo cual es atribuible a la presencia de materiales cementicios con alta capacidad de reactivación que causan este fenómeno dentro de la estructura del material, al igual que la presencia de partículas puzolánicas, producto de los demás componentes presentes en el agregado, permitiendo así demostrar que este material cuenta con propiedades relevantes y únicas que se traducen en un aumento de su capacidad de resistencia, durabilidad y estabilidad con el aumento de los días y la cual se esperaría que siga en aumento con periodos más prolongados de curado.

## 4.2 DESEMPEÑO ESTRUCTURAL MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE PAVIMENTOS CON DIFERENTES COMPOSICIONES DE MATERIALES EN SU ESTRUCTURA

De acuerdo a las condiciones a las cuales se encuentran sometidos los 4 tipos de pavimentos, las deformaciones admisibles resultantes se establecieron en  $4,74 \times 10^{-4}$  y  $5,16 \times 10^{-4}$  para fatiga y ahuellamiento respectivamente, correspondientes a los valores máximos en los que estos deben ubicarse sin excederlos para tener un comportamiento adecuado de la estructura.

Relacionado con el **pavimento 1**, como resultado del proceso de iteración para determinar los espesores más adecuados que garantizaran un desempeño óptimo de la estructura constituida completamente por agregados convencionales y que mantuvieran las deformaciones dentro de los límites aceptables; estos se establecieron en 7 cm, 20 cm y 35 cm para la carpeta asfáltica, la base granular y la subbase granular, respectivamente, como se detalla en la Ilustración 39. Además, el módulo resiliente de la subbase granular, calculado utilizando ecuaciones recomendadas por la Shell, se fijó en 100,6 MPa, al igual que el de la base granular, que se determinó en 225 MPa, teniendo en cuenta los espesores asumidos para tales capas en esta configuración específica.

*Ilustración 39. Estructura de pavimento 1*

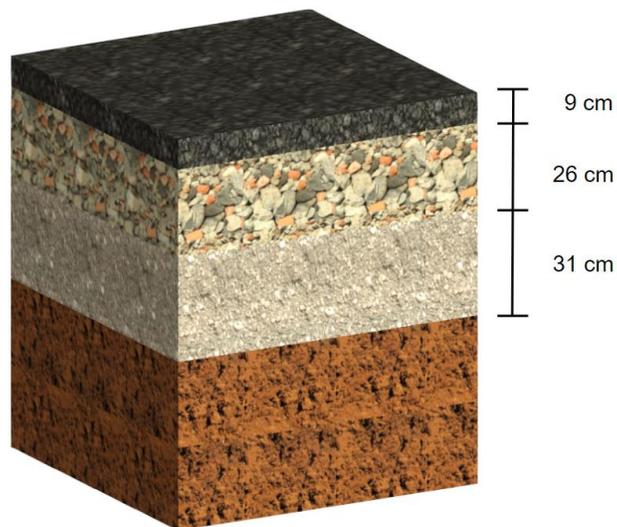


Fuente: Elaboración propia de la autora.

Es así como al realizar el procesamiento de datos mediante la incorporación del software Weslea, se obtuvieron resultados para deformaciones de tracción producidos en la carpeta asfáltica correspondientes a  $3,33 \times 10^{-4}$  y de  $4,94 \times 10^{-4}$  para las deformaciones de compresión sufridas en la subrasante, cumpliendo con los valores de admisibilidad establecidos para el chequeo del cumplimiento de estas deformaciones y planteando así la capacidad de la estructura a no sufrir alteraciones que afecten su serviciabilidad, calidad y seguridad durante el periodo de diseño por la acción de los esfuerzos soportados.

En cuanto a los espesores correspondientes a las capas que conforman el **pavimento 2**, donde se tiene una composición estructural por agregados de extracción natural en toda la estructura, a excepción de la base granular constituida por AR combinado con material de aporte, los espesores de diseño que representan un comportamiento adecuado de la estructura quedaron definidos como 9 cm, 26 cm y 31 cm para la carpeta asfáltica, la base granular y la subbase granular respectivamente como se puede apreciar en la Ilustración 40. Además, el módulo resiliente de la subbase granular, calculado utilizando ecuaciones recomendadas por la Shell, se fijó en 95,3 MPa, y el módulo de la base granular determinado mediante estudios realizados por (García, 2023) se estableció en 88 MPa de acuerdo a los esfuerzos geostáticos y por carga definidos para este caso que se muestran en la Tabla 35, y que se relacionaron en la Gráfica 18, para obtener el valor de módulo resiliente expresado, teniendo en cuenta los espesores asumidos para tales capas en esta configuración específica.

*Ilustración 40. Estructura de pavimento 2*



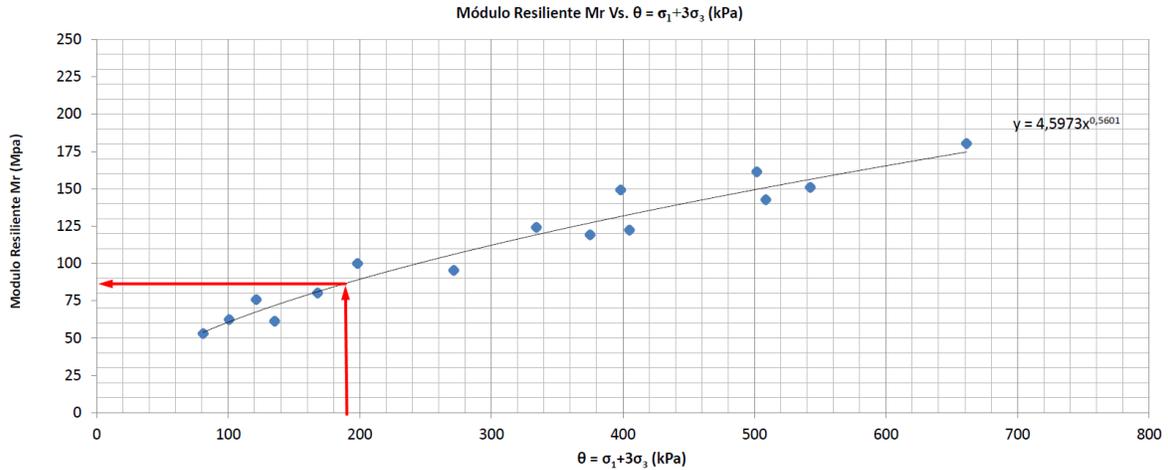
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Tabla 35. Esfuerzos por carga, geostáticos, totales y  $\theta$  para módulo resiliente de base granular de pavimento 2

ESFUERZOS POR CARGAS					
Esfuerzo <u>vertical</u> por <u>carga</u> (TOTAL)	$\sigma_z$	1,55	kg/cm2		
Esfuerzo <u>horizontal</u> por <u>carga</u> (TOTAL)	$\sigma_r$	0,03	kg/cm2		
ESFUERZOS GEOSTÁTICOS					
Esfuerzo <u>vertical geostático</u> en la CA	$\sigma_{z\text{vertical CA}}$	0,13	Ton/m2	0,01	kg/cm2
Esfuerzo <u>vertical geostático</u> en la BG	$\sigma_{z\text{vertical BG}}$	0,34	Ton/m2	0,03	kg/cm2
<b>Esfuerzo <u>vertical geostático</u> (TOTAL)</b>		<b>0,47</b>	<b>Ton/m2</b>	<b>0,05</b>	<b>kg/cm2</b>
<b>Esfuerzo <u>horizontal geostático</u> (TOTAL)</b>	$\sigma_{z\text{horizontal}}$	<b>0,09</b>	<b>kg/cm2</b>		
ESFUERZOS TOTALES					
<b>Esfuerzos verticales totales</b>	$\sigma_{VT}$	1,59	kg/cm2	22,70	psi
<b>Esfuerzos horizontales totales</b>	$\sigma_{HT}$	0,12	kg/cm2	1,73	psi
<b><math>\Theta T</math></b>		<b>27,88</b>	<b>psi</b>	<b>192,3</b>	<b>KPa</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 18. Módulo resiliente para base granular de pavimento 2



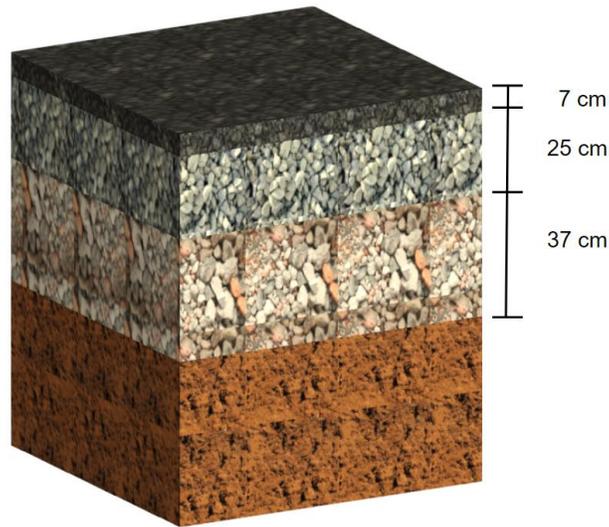
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Se puede observar a través de los resultados obtenidos del diseño del pavimento frente a condiciones de serviciabilidad, que este demuestra un comportamiento satisfactorio. Esto se refleja en el cumplimiento de sus deformaciones por fatiga y ahuellamiento, las cuales son de  $4,50 \times 10^{-3}$  y  $5,14 \times 10^{-4}$  en el orden dado, situándose dentro de los valores admisibles requeridos, además de ser similares a las resultantes de un pavimento compuesto con agregados naturales de características adecuadas. Estos hallazgos plantean que la estructura tiene la capacidad de resistir deformaciones dentro del rango admisible bajo los esfuerzos a los que se expone durante su vida útil, cumpliendo así con los estándares de calidad, seguridad y funcionalidad establecidos, así como también revela la adecuada capacidad de los AR para funcionar como una base granular.

Con respecto al diseño que demostraba un mejor comportamiento, definido mediante iteraciones para el tipo de **pavimento 3**, conformado por materiales granulares en las capas que lo constituyen, a excepción de la subbase granular, la cual se compuso por agregados reciclados en conjunto con material granular natural de aporte, se definieron los espesores adecuados para tal caso en 7 cm para la capa de la carpeta asfáltica, 25 cm para la base granular y 37 cm para la subbase granular tal como se puede apreciar en la Ilustración 41. Relacionado con los módulos resilientes de la base y subbase granular, para el caso del primer material se definió en 151,91 MPa mediante el cálculo con ecuaciones recomendadas por la Shell y para el segundo material calculado empleando estudios realizados por (García, 2023) se estableció en 74 MPa, de acuerdo a los esfuerzos geostáticos y por carga definidos para este caso que se muestran en la Tabla 36, y que se relacionaron en la Gráfica 19, para obtener el valor de módulo resiliente

mencionado, teniendo en cuenta los espesores asumidos para tales capas en esta configuración específica.

Ilustración 41. Estructura de pavimento 3



Fuente: Elaboración propia de la autora.

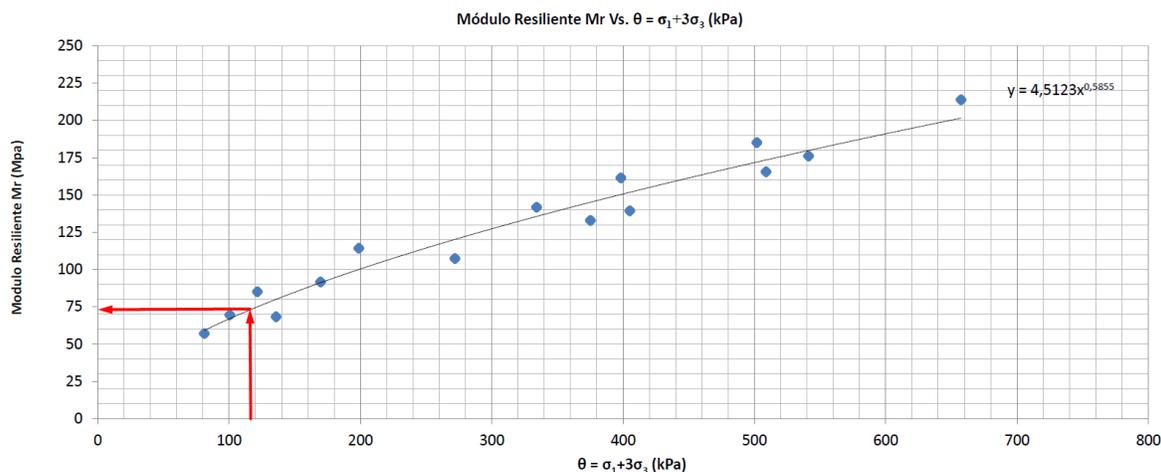
Tabla 36. Esfuerzos por carga, geostáticos, totales y  $\theta$  para módulo resiliente de subbase granular de pavimento 3

ESFUERZOS POR CARGAS					
Esfuerzo <u>vertical</u> por <u>carga</u> (TOTAL)	$\sigma_z$	0,36			kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo <u>horizontal</u> por <u>carga</u> (TOTAL)	$\sigma_r$	-0,002			kg/cm <sup>2</sup>
ESFUERZOS GEOSTÁTICOS					
Esfuerzo <u>vertical geostático</u> en la CA	$\sigma_{z\text{vertical CA}}$	0,11	Ton/m <sup>2</sup>	0,011	kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo <u>vertical geostático</u> en la BG	$\sigma_{z\text{vertical BG}}$	0,65	Ton/m <sup>2</sup>	0,06	kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo <u>vertical geostático</u> en la SBG	$\sigma_{z\text{vertical SBG}}$	0,48	Ton/m <sup>2</sup>	0,05	kg/cm <sup>2</sup>
<b>Esfuerzo vertical geostático (TOTAL)</b>		<b>1,24</b>	<b>Ton/m<sup>2</sup></b>	<b>0,12</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>

<b>Esfuerzo horizontal geostático (TOTAL)</b>	$\sigma_{\text{horizontal}}$	<b>0,25</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>		
<b>ESFUERZOS TOTALES</b>					
<b>Esfuerzos verticales totales</b>	$\sigma_{\text{VT}}$	0,49	kg/cm <sup>2</sup>	6,92	psi
<b>Esfuerzos horizontales totales</b>	$\sigma_{\text{HT}}$	0,24	kg/cm <sup>2</sup>	3,46	psi
<b><math>\Theta T</math></b>		17,32	psi	<b>119,4</b>	<b>KPa</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 19. Módulo resiliente para subbase granular de pavimento 3



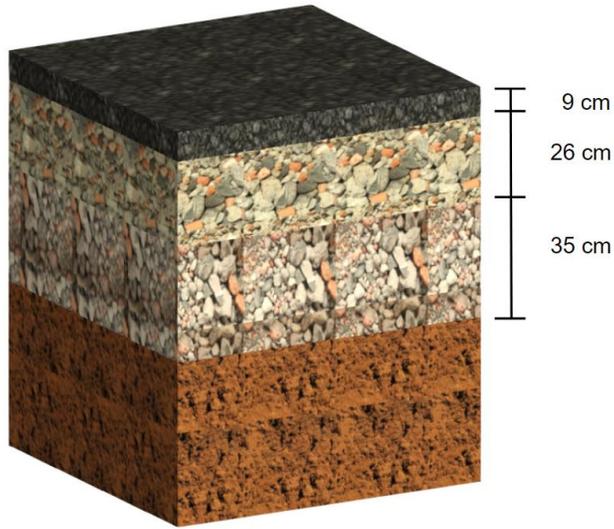
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Posterior al procesamiento de datos se obtuvo para este tipo de pavimento, una deformación por fatiga correspondiente a  $4,17 \times 10^{-4}$  y de  $4,86 \times 10^{-4}$  para ahuellamiento, valores que se encuentran en un rango cercano a las deformaciones sufridas por una estructura de pavimento convencional, corroborando de esta manera la idoneidad de la implementación de los residuos de construcción y demolición en capas de la estructura de pavimento, y más específicamente en este caso en el material usado para conformar la subbase granular.

Relacionado con el **pavimento 4**, cuya estructura estuvo conformada por agregados naturales en la carpeta asfáltica, agregados reciclados en la base y subbase granular y agregados naturales en la subrasante, se pudo determinar luego

de un proceso de iteración para definir los espesores adecuados en los cuales el pavimento demostraría un mejor comportamiento fueron establecidos en 9 cm, 26 cm y 35 cm nombrando inicialmente el valor correspondiente a la capa superior de la estructura, como se representa en la Ilustración 42. Además, los módulos resilientes necesarios para definir las variables mencionadas, fueron establecidos en 88 MPa para la capa de la base granular de acuerdo a estudios realizados por (García, 2023), caso similar a la subbase granular compuesta por AR cuyo valor correspondió a 74 MPa de acuerdo a la configuración establecida en este caso y a los esfuerzos geostáticos y por carga definidos, como se muestran en las tablas Tabla 37 y Tabla 38, y que se relacionaron en las gráficas Gráfica 20 y Gráfica 21, para tal configuración.

*Ilustración 42. Estructura de pavimento 4*



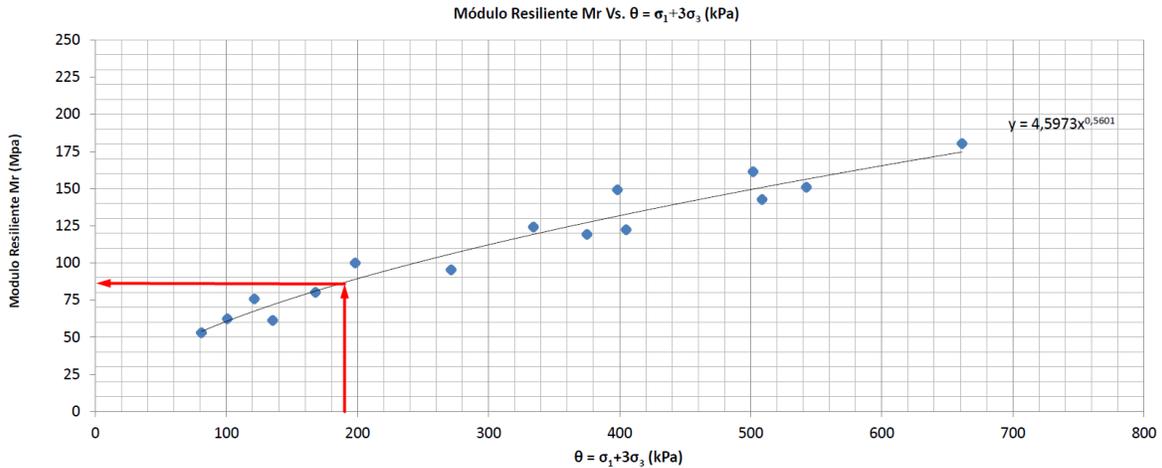
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Tabla 37. Esfuerzos por carga, geostáticos, totales y  $\theta$  para módulo resiliente de base granular de pavimento 4

<b>ESFUERZOS POR CARGAS</b>					
Esfuerzo <u>vertical</u> por <u>carga</u> (TOTAL)	$\sigma_z$	1,55	kg/cm <sup>2</sup>		
Esfuerzo <u>horizontal</u> por <u>carga</u> (TOTAL)	$\sigma_r$	0,03	kg/cm <sup>2</sup>		
<b>ESFUERZOS GEOSTÁTICOS</b>					
Esfuerzo <u>vertical geostático</u> en la CA	$\sigma_{z\text{vertical CA}}$	0,14	Ton/m <sup>2</sup>	0,01	kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo <u>vertical geostático</u> en la BG	$\sigma_{z\text{vertical BG}}$	0,34	Ton/m <sup>2</sup>	0,03	kg/cm <sup>2</sup>
<b>Esfuerzo vertical geostático (TOTAL)</b>		<b>0,47</b>	<b>Ton/m<sup>2</sup></b>	<b>0,05</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Esfuerzo horizontal geostático (TOTAL)</b>	$\sigma_{z\text{horizontal}}$	<b>0,09</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>		
<b>ESFUERZOS TOTALES</b>					
<b>Esfuerzos verticales totales</b>	$\sigma_{VT}$	1,59	kg/cm <sup>2</sup>	22,7	psi
<b>Esfuerzos horizontales totales</b>	$\sigma_{HT}$	0,12	kg/cm <sup>2</sup>	1,73	psi
<b><math>\Theta T</math></b>		<b>27,89</b>	<b>psi</b>	<b>192,3</b>	<b>KPa</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 20. Módulo resiliente para base granular de pavimento 4



Fuente: Elaboración propia de la autora.

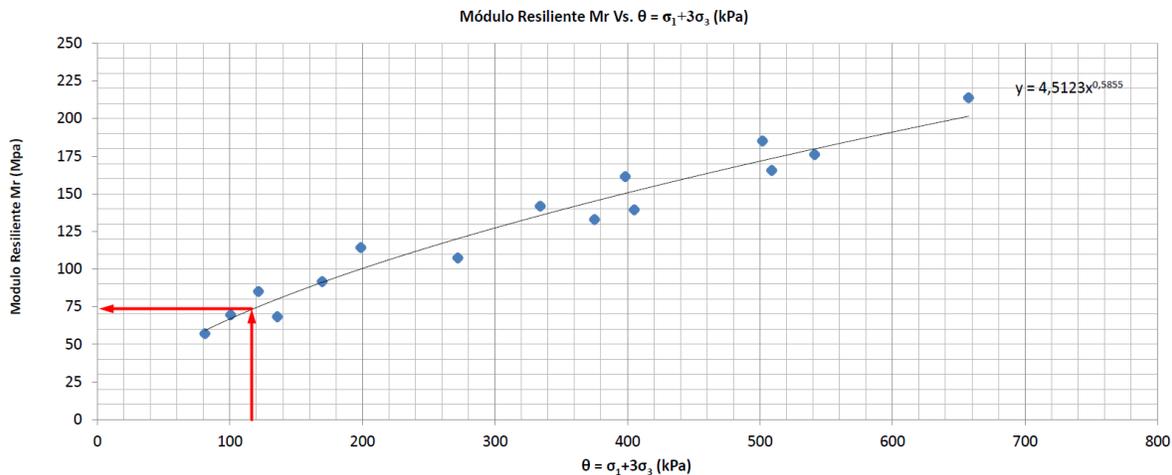
Tabla 38. Esfuerzos por carga, geostáticos, totales y  $\theta$  para módulo resiliente de subbase granular de pavimento 4

ESFUERZOS POR CARGAS					
Esfuerzo <u>vertical</u> por <u>carga</u> (TOTAL)	$\sigma_z$	0,34	kg/cm2		
Esfuerzo <u>horizontal</u> por <u>carga</u> (TOTAL)	$\sigma_r$	-0,002	kg/cm2		
ESFUERZOS GEOSTÁTICOS					
Esfuerzo <u>vertical</u> <u>geostático</u> en la CA	$\sigma_{z\text{vertical CA}}$	0,13	Ton/m2	0,01	kg/cm2
Esfuerzo <u>vertical</u> <u>geostático</u> en la BG	$\sigma_{z\text{vertical BG}}$	0,68	Ton/m2	0,07	kg/cm2
Esfuerzo <u>vertical</u> <u>geostático</u> en la SBG	$\sigma_{z\text{vertical SBG}}$	0,45	Ton/m2	0,05	kg/cm2
<b>Esfuerzo vertical geostático (TOTAL)</b>		<b>1,27</b>	<b>Ton/m2</b>	<b>0,13</b>	<b>kg/cm2</b>
<b>Esfuerzo horizontal geostático (TOTAL)</b>	$\sigma_{z\text{horizontal}}$	<b>0,25</b>	<b>kg/cm2</b>		
ESFUERZOS TOTALES					
Esfuerzos verticales totales	$\sigma_{VT}$	0,46	kg/cm2	6,60	psi

Esfuerzos horizontales totales	$\sigma_{HT}$	0,25	kg/cm2	3,55	psi
<b><math>\Theta T</math></b>		17,24	psi	<b>119</b>	<b>KPa</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 21. Módulo resiliente para subbase granular de pavimento 4



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Los valores correspondientes a las deformaciones sufridas en este tipo de pavimento por fatiga y ahuellamiento corresponden a  $4,57 \times 10^{-4}$  y  $5,01 \times 10^{-4}$  respectivamente, cifras de deformación que se encuentran dentro de los valores establecidos para definir si el diseño de pavimento es adecuado, donde este en particular encuentra ubicación y que son similares a las del pavimento 1, conformado por agregados naturales de adecuado comportamiento; por lo cual, se puede decir que el empleo de agregados reciclados como en este caso, resulta viable para la implementación de tecnologías innovadoras como los son la conformación de un pavimento con agregados reciclados usados en las capas de base y subbase granular.

En general, los valores de deformaciones sufridas en la capa inferior de la carpeta asfáltica por fatiga y las ocasionadas en la capa superior de la subrasante por ahuellamiento para cada uno de los 4 tipos de pavimentos, revelan que una estructura conformada con AR de manera variada en las capas de base o subbase granular genera un comportamiento adecuado demostrado por su ubicación para estas mediciones dentro de los valores permitidos de admisibilidad, verificando así la capacidad de estos materiales para rendir de manera similar a un agregado convencional.

### 4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO MEDIANTE LA COMPARACIÓN DE PAVIMENTOS CON DIFERENTES COMPOSICIONES DE MATERIALES EN SU ESTRUCTURA

Según los valores asignados para cada uno de los materiales y teniendo en cuenta las cantidades necesarias para la construcción por km de pavimento, se obtuvieron los costos que se muestran a continuación en las tablas Tabla 39, Tabla 40, Tabla 41, Tabla 42, para el pavimento tipo 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

*Tabla 39. Costo de materiales por km del pavimento tipo 1*

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio total</b>
Mezcla densa en caliente MDC-19 instalada	m <sup>3</sup>	\$ 795.980	420	\$ 334.311.600
Base granular Clase B instalada	m <sup>3</sup>	\$ 220.070	1200	\$ 264.084.000
Subbase granular Clase B instalada	m <sup>3</sup>	\$ 210.090	2100	\$ 441.189.000
<b>COSTO POR MATERIALES DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO 1</b>				<b>\$ 1.039.584.600</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Tabla 40. Costo de materiales por km del pavimento tipo 2*

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio total</b>
Mezcla densa en caliente MDC-19 instalada	m <sup>3</sup>	\$ 795.980	540	\$ 429.829.200
Base granular Clase B instalada – Compuesta con AR	m <sup>3</sup>	\$ 198.300	1560	\$ 309.348.000
Subbase granular Clase B instalada	m <sup>3</sup>	\$ 210.090	1860	\$ 390.767.400
<b>COSTO POR MATERIALES DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO 2</b>				<b>\$ 1.129.944.600</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Tabla 41. Costo de materiales por km del pavimento tipo 3

Material	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio total
Mezcla densa en caliente MDC-19 instalada	m <sup>3</sup>	\$ 795,980	420	\$ 334.311.600
Base granular Clase B instalada	m <sup>3</sup>	\$ 220,070	1500	\$ 330.105.000
Subbase granular Clase B instalada – Compuesta con AR	m <sup>3</sup>	\$ 189,000	2220	\$ 419.580.000
<b>COSTO POR MATERIALES DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO 3</b>				<b>\$ 1.083.996.600</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Tabla 42. Costo de materiales por Km del pavimento tipo 4

Material	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Precio total
Mezcla densa en caliente MDC-19 instalada	m <sup>3</sup>	\$ 795,980	540	\$ 429.829.200
Base granular Clase B instalada - Compuesta con AR	m <sup>3</sup>	\$ 198,300	1560	\$ 309.348.000
Subbase granular Clase B instalada - Compuesta con AR	m <sup>3</sup>	\$ 189,000	2100	\$ 396.900.000
<b>COSTO POR MATERIALES DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO 4</b>				<b>\$ 1.136.077.200</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Se pudo notar que el incremento de costos para los pavimentos compuestos con AR en su estructura no supera el 10% del costo total de un pavimento compuesto por agregados naturales, pues el incremento corresponde al 8,69% para el pavimento tipo 2, al 4,27% para el pavimento 3 y al 9,28% para el pavimento 4, demostrando así que el incremento económico de la incorporación de este tipo de agregados no representa un impacto significativo teniendo en cuenta los beneficios medioambientales y de sostenibilidad que se derivan de la incorporación de estos recursos tecnológicos y que además en el caso de que este aumente su demanda

teniendo en cuenta también las cuestiones normativas de obligatoria empleabilidad de esto agregados en las construcciones, sus valores podrían reducir y llegar a cifras incluso menores que las ya reportadas y las asignadas a materiales granulares tradicionales.

#### **4.4 EVALUACIÓN DE VARIACIÓN GRANULOMÉTRICA**

A continuación se exponen los resultados asociados a cada una de las fases propuestas para la evaluación de la variación granulométrica que sufren los agregados reciclados tras su proceso de compactación y se establece una granulometría de trabajo por medio de relaciones matemáticas, para que al someter los materiales a dichas condiciones que le produzcan su densidad adecuada, estos, se posicionen dentro de una distribución de tamaños correcta para su empleabilidad.

##### **4.4.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino INV E – 213 – 22, para BG-40 y SBG-50 (*Granulometría inicial*)**

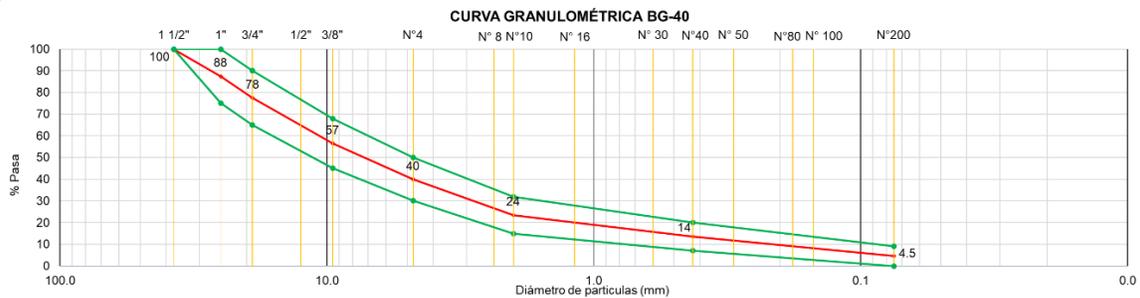
La *granulometría inicial* establecida para preparar especímenes de 6.000 g para el ensayo modificado de compactación, reteniendo pesos específicos en cada tamaño de tamiz para la creación de una base granular 40 y una subbase granular 50 con agregados reciclados y que permitió el desarrollo de esta etapa de medición, se muestran en las tablas Tabla 43 y Tabla 44 y en las gráficas Gráfica 22 y Gráfica 23 respectivamente, donde se puede apreciar un material con una condición de distribución de tamaños adecuada, al encontrarse en una posición entre los límites superior e inferior establecidos para ambos tipos de gradaciones.

Tabla 43. Cálculo de cantidades para espécimen de 6000 g para granulometría de AR como BG-40

BG-40							
No. Tamiz	Tamiz (mm)	% Pasa		% Pasa promedio	% Retenido	% Retenido acumulado	Cálculo por espécimen de (6000g)
		Límite Inferior	Límite superior				
1 1/2"	37,5	100	100	100	0	0	0
1"	25,0	100	75	88	13	12,5	750
3/4"	19,0	90	65	78	10	22,5	600
3/8"	9,5	68	45	57	21	43,5	1.260
No. 4	4,75	50	30	40	17	60,0	990
No. 10	2,00	32	15	24	17	76,5	990
No. 40	0,425	20	7	14	10	86,5	600
No. 200	0,075	9	0	4,5	9	95,5	540
Pasa 200	-	-	-	-	4.5	100	270
TOTAL					100		6.000

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 22. Curva granulométrica de AR como BG-40



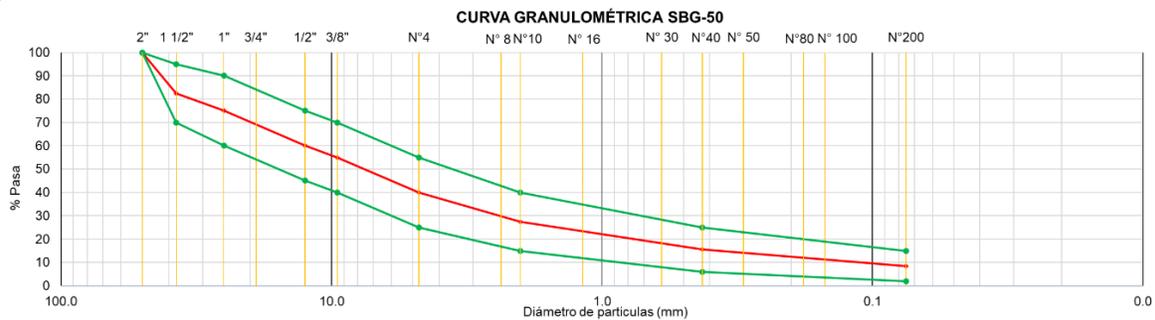
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Tabla 44. Cálculo de cantidades para espécimen de 6000 g para granulometría de AR como SBG-50

SBG-50							
No. Tamiz	Tamiz (mm)	% Pasa		% Pasa promedio	% Retenido	% Retenido acumulado	Cálculo por espécimen de (6000g)
		Límite Inferior	Límite superior				
2"	50,0	100	100	100	0	0,0	0
1 1/2"	37,5	70	95	83	18	17,5	1.050
1"	25,0	60	90	75	8	25,0	450
1/2"	12,5	45	75	60	15	40,0	900
3/8"	9,5	40	70	55	5	45,0	300
No. 4	4,75	25	55	40	15	60,0	900
No. 10	2,00	15	40	28	13	72,5	750
No. 40	0,425	6	25	16	12	84,5	720
No. 200	0,075	2	15	8,5	7	91,5	420
Pasa 200	-	-	-	-	8,5	100,0	510
Total					100		6.000

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 23. Curva granulométrica de AR como SBG-50

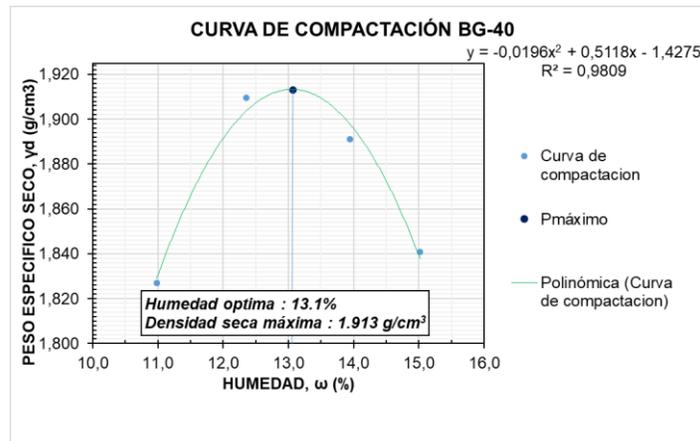


Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### 4.4.2 Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación) INV E – 142 – 22, para BG-40 y SBG-50

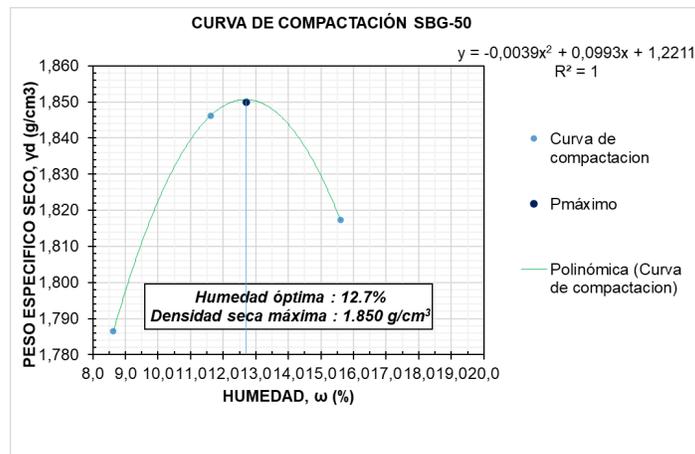
Así mismo, una vez con las gradaciones de trabajo establecidas, se determinó por medio del ensayo de proctor modificado, la humedad óptima a la cual los dos tipos de materiales desarrollarían su densidad máxima, quedando establecida para la base granular en un 13,1% con una densidad de 1,913 g/cm<sup>3</sup> y para la subbase granular en 12,7% con una densidad de 1,850 g/cm<sup>3</sup>, esto se expone de manera detallada en las gráficas Gráfica 24 y Gráfica 25, para cada uno de los materiales.

Gráfica 24. Curva de compactación AR como BG-40



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 25. Curva de compactación AR como SBG-50



Fuente: Elaboración propia de la autora.

#### **4.4.3 Degradación de los agregados pétreos a causa de la compactación por impactos INV E – 243 – 22, para BG-40 y SBG-50 (*Granulometría luego de compactación*)**

Finalmente, tras realizar todo el proceso de medición de granulometrías iniciales para base y subbase granular y establecer la humedad óptima que generaba la densidad máxima para cada uno de los materiales; se procedió a realizar la compactación del material teniendo en cuenta dicha información, para simular condiciones reales a las cuales estará sometido, con el fin de analizar la granulometría luego de compactación tanto de su fracción gruesa como fina. En las tablas Tabla 45 y Tabla 46 y en la Gráfica 26 se muestran los cambios correspondientes a la BG-40, al igual que en las tablas Tabla 47 y Tabla 48 y en la Gráfica 27, se muestran las variabilidades percibidas en la SBG-50.

Se puede evidenciar entonces primeramente para el caso de la BG-40, que la variabilidad encontrada se aleja en una proporción moderada con respecto a la granulometría establecida para el agregado inicialmente, esto, demostrado además porque la composición del agregado se mantiene dentro de los límites superior e inferior definidos, sin embargo esta variación granulométrica genera un aumento en la cantidad de finos debido a la quiebra de material grueso, además de que se percibe un aspecto anaranjado en el agregado posterior a este procesamiento, indicando que la mayoría de componente que conllevó a este comportamiento fue el ladrillo como se muestra en la Ilustración 43, mostrando su susceptibilidad al desmoronamiento y más si este fue sometido a condiciones de compactación que al igual que otros materiales tales como el hormigón, mortero y partículas cementicias generan el desprendimiento de partículas; es por esto que el retiro de este componente debe considerarse dependiendo de las aplicaciones previstas para el material.

Tabla 45. Granulometría después de compactación de AR como BG-40

Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E – 213 – 22)					
Tamiz	mm	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
3/4"	19,0	0,0	0,0	0,0	100
1/2"	12,5	1.140,0	14,4	14,4	86
3/8"	9,5	785,0	9,9	24,3	76
N4	4,75	1.610,0	20,3	44,6	55
N10	2,00	1.350,0	17,0	61,7	38
N40	0,425	1.250,0	15,8	77,5	23
N200	0,075	887,8	11,2	88,7	11
Fondo	0	895,4	11,3	100,0	0
Sumatoria		7.918,2	100,0		
Peso seco inicial		7.920,0			

Fuente: Elaboración propia de la autora.

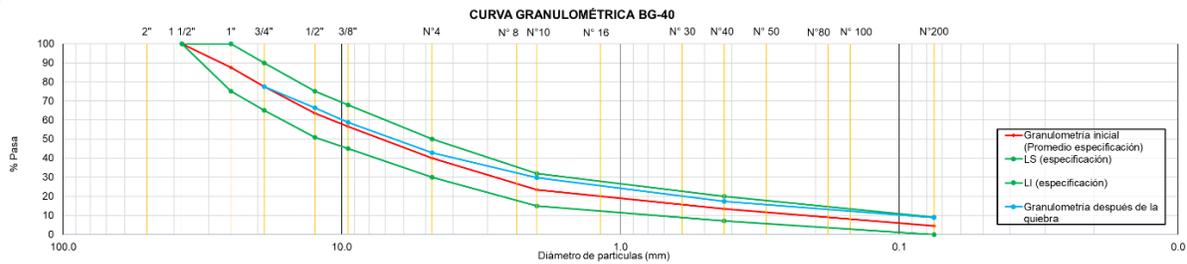
Tabla 46. Comparación de granulometría inicial vs granulometría luego de compactación de AR como BG-40

BG-40														
Tamiz	Tamiz (mm)	%Pasa		% Pasa Promedio	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Retenido Inicial	Cálculo por espécimen de (4500g)	% Pasa Inicial	% Retenido final	% Pasa final	% Retenido gradación completa a partir de 1/2"	% Pasa gradación completa a partir de 1/2"	D
		Límite superior	Límite inferior											
1 1/2"	37,5	100	100	100	0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-
1"	25,0	100	75	88	13	12,5	-	-	-	-	-	-	-	-
3/4"	19,0	90	65	78	10	22,5	0	0	100	0	100	0	78	-
1/2"	12,5	75	51	64	14	36,4	18	805	82	14	85	11	66	3
3/8"	9,5	68	45	57	7	43,5	9	414	73	10	75	8	59	2
No. 4	4,75	50	30	40	17	60,0	21	958	52	20	55	16	43	3
No. 10	2,00	32	15	24	17	76,5	21	958	30	17	38	13	30	6

No. 40	0,425	20	7	14	10	86,5	13	581	17	16	23	12	17	4
No. 200	0,075	9	0	4,5	9	95,5	12	523	6	11	12	9	9	4
Pasa a 200	-	-	-	-	4,5	100	6	261	0	11	0	9	0	
Total					100		100	4.500		100		78		22
							Antes de quiebra	Después de quiebra		Gradación llevada a % Pasa de la gradación completa				
										Índice de degradación			4	

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 26. Curva granulométrica comparativa de AR como BG-40 después de compactación



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Ilustración 43. Desmoronamiento de ladrillo después de compactación



Fuente: Elaboración propia de la autora.

En cuanto al índice de degradación Proctor (IDp) obtenido para la base granular, este corresponde a un valor de 4, indicando que hubo una degradación del material

durante el proceso de compactación como ya se mencionó; un número reducido ante este parámetro indica que el material no tiene implicaciones relacionadas con la estabilidad y la resistencia en su aplicación final, sin embargo se respalda entonces la idea de la implementación de un método para evitar estos cambios en la composición del agregado, como se mostrará posteriormente.

En relación a lo ocurrido con la SBG-50, se observa que la variabilidad detectada también se aparta moderadamente de la granulometría inicialmente establecida para el agregado. Esto se confirma por el hecho de que la composición del agregado se mantiene dentro de los límites superior e inferior definidos. No obstante, esta variación en la granulometría ha llevado a un aumento en la cantidad de finos debido a la fragmentación del material grueso. Además, se notó también un tono anaranjado en el agregado después del procesamiento, lo cual sugiere que el ladrillo fue el principal responsable de este comportamiento, mostrando su tendencia a desmoronarse, especialmente bajo condiciones de compactación que provocan el desprendimiento de partículas. Por ello, se debe considerar la eliminación de este componente, dependiendo de las aplicaciones destinadas para uso del material.

*Tabla 47. Granulometría después de compactación de AR como SBG-50*

<b>Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (INV E – 213 – 22)</b>					
<b>Tamiz</b>	<b>mm</b>	<b>Peso retenido (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>%Pasa</b>
3/4"	19,0	0,0	0,0	0,0	100
1/2"	12,5	795,0	10,3	10,3	90
3/8"	9,5	590,0	7,7	18,0	82
N4	4,75	1.595,0	20,7	38,7	61
N10	2,00	1.335,0	17,3	56,0	44
N40	0,425	1.295,0	16,8	72,9	27
N200	0,075	755,0	9,8	82,7	17
Fondo	0	1.335,0	17,3	100,0	0
Sumatoria		7.700,0	100,0		
Peso seco inicial		7.700,0			

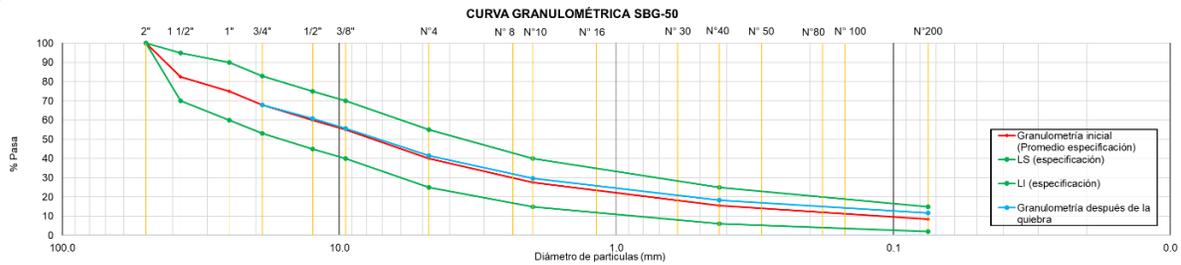
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Tabla 48. Comparación de granulometría inicial vs granulometría luego de compactación de AR como SBG-50

SBG-50														
Tamiz	Tamiz (mm)	%Pasa		% Pasa Promedio	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Retenido Inicial	Cálculo por espécimen de (4500g)	% Pasa Inicial	% Retenido final	% Pasa final	% Retenido gradación completa a partir de 1/2"	% Pasa gradación completa a partir de 1/2"	D
		Límite inferior	Límite superior											
2"	50,0	10 0	10 0	10 0	0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	70	95	83	18	17, 5	-	-	-	-	-	-	-	-
1"	25,0	60	90	75	8	25	-	-	-	-	-	-	-	-
3/4"	19,0	53	83	68	7	32, 2	0	0	10 0	0	10 0	-	68	-
1/2"	12,5	45	75	60	8	40	12	518	88	10	90	7	61	1
3/8"	9,5	40	70	55	5	45	7	332	81	8	82	5	56	1
No. 4	4,75	25	55	40	15	60	22	996	59	21	61	14	42	2
No. 10	2,00	15	40	28	13	72, 5	18	830	41	17	44	12	30	2
No. 40	0,42 5	6	25	16	12	84, 5	18	796	23	17	27	11	18	3
No. 200	0,07 5	2	15	8,5	7	91, 5	10	465	13	10	17	7	12	3
Pasa 200	-	-	-	-	8,5	100	13	564	0	17	0	12	0	
TOTAL					10 0		10 0	4.50 0		10 0		68		1 1
							Antes de quiebra		Después de quiebra		Gradación llevada a % pasa de la gradación completa			
											Índice de degradación		2	

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Gráfica 27. Curva granulométrica comparativa de AR como SBG-50 después de compactación



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Referente al Índice de degradación Proctor (IDp) obtenido para este segundo tipo de material, correspondió a un valor de 2, lo cual señala que el material experimentó una degradación durante el proceso de compactación, que a su vez es más baja en comparación a lo ocurrido con la base granular, donde se encuentra una mayor presencia de material grueso susceptible a desmoronamiento. Sin embargo, aunque este valor es reducido, e indica que el material no conlleva riesgos elevados a sufrir inestabilidad o reducción de su resistencia, se deben evitar en gran proporción estas variaciones introduciendo técnicas que eviten estos comportamientos, como se muestra en el ítem siguiente.

#### 4.4.4 Establecimiento de *granulometría de trabajo* antes de compactación, mediante relaciones matemáticas

Mediante todo el estudio, enfocado a medir la variación granulométrica que sufren los AR en su proceso de compactación, se puede determinar entonces, que la granulometría adecuada a la que se debe someter los áridos antes de compactación para evitar sobresaltos en los límites de la curva granulométrica y que puedan llegar a afectar su desempeño final debido a una variación del tamaño de sus partículas, queda determinada por la resta de la diferencia de la variación ocurrida en cada tamiz a la granulometría inicial del agregado, tal como se muestra en la Ecuación 7:

*Ecuación 7. Granulometría de trabajo para cada tamiz de AR*

$$GTT = Gi - (Gf - Gi)$$

Donde:

*GTT* = Granulometría de trabajo para X tamaño de partícula, en porcentaje.

$G_i$  = Cantidad pasante en X tamiz antes de la compactación, en porcentaje.  
 $G_f$  = Cantidad pasante en X tamiz después de la compactación, en porcentaje.

Es importante tener en cuenta que esta fórmula de trabajo debe emplearse para determinar la misma en cada tamiz y que también debe usarse para cada tipo de material constituido por AR al cual se le vaya a dar aplicación en pavimentación, teniendo en cuenta que estos mismos contienen una susceptibilidad alta a variaciones en su composición dependiendo de su lugar de origen y procesos a los cuales ha sido sometido, por ello, para cada lote de agregado al cual se le vaya a dar uso, debe ser evaluado mediante este método para su posterior aplicación, implementando siempre las medidas óptimas que garanticen una calidad adecuada.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos y el análisis de la información realizado durante la investigación, se puede concluir que:

El desempeño de los agregados reciclados en los ensayos de laboratorio fue satisfactorio, evidenciando sus capacidades en términos de resistencia, durabilidad y calidad.

El uso de agregados reciclados como material de base y subbase granular en pavimentos está ampliamente demostrado. Según los resultados de la investigación, estos agregados no solo cumplen con los rangos de aceptabilidad establecidos, sino que, en muchos casos, sus características son similares o incluso superiores a las de los agregados convencionales. El agregado reciclado mostró valores adecuados en términos de dureza, durabilidad, limpieza, geometría de las partículas y resistencia, que además están en concordancia con los valores establecidos en la normativa INVIAS para los agregados utilizados en infraestructura vial y en los casos en que no se cumpla con la especificación requerida, y el proyecto así lo exija, este podrá ser mejorado con la adición de un material complementario.

La eliminación del ladrillo en la composición de los RCD mejora las propiedades del agregado, elevando su resistencia y optimizando su comportamiento.

En el caso en que se obtengan resultados que varíen con respecto a lo exigido para materiales granulares naturales es correcto, teniendo en cuenta que los AR no son materiales iguales y que, además, aunque esta comparación pueda resultar en una exigencia mayor, se puede notar que se comportan de una manera adecuada.

Los ensayos de CBR realizados sobre el material de RCD, tras distintos períodos de curado, muestran que su resistencia aumenta debido a las propiedades de autocementación de los elementos puzolánicos presentes en su estructura, que se reactivan en ambientes húmedos. Los resultados son favorables, demostrados por un aumento de la resistencia de hasta el 36% a 28 días de curado en comparación con los valores iniciales. Esto sugiere que el material proporcionará una estructura de pavimento más rígida, con condiciones de calidad mejoradas y mayor durabilidad.

El análisis estructural realizado al AR incorporado en una estructura de pavimento de distintas maneras demostró que estos materiales pueden llegar a generar deformaciones por fatiga y ahuellamiento afines a las de un pavimento compuesto con agregados naturales, incluso cuando se utilizan espesores similares, lo cual resalta su potencial de calidad y resistencia.

La integración de RCD en actividades constructivas reduce los costos operativos asociados con la extracción y el transporte de materiales convencionales. Esto se debe a que los RCD solo requieren selección y trituración, lo que acorta los desplazamientos y simplifica su manejo.

El uso de agregados reciclados puede ser económicamente ventajoso y de alta calidad, siempre y cuando se disponga de instalaciones adecuadas para su procesamiento, lo que ayuda a evitar un aumento significativo en los costos asociados.

Se observó que el material no presenta una alta susceptibilidad a la quiebra. Sin embargo, se desarrolló un método para definir una granulometría de trabajo que el material debe alcanzar antes de la compactación. Esto asegura que, una vez completado el proceso, el material se mantenga dentro de los rangos admisibles de granulometría y que sus demás características no se vean afectadas ante esta condición.

Implementar esta práctica sostenible ayuda a mitigar la contaminación al reducir la cantidad de RCD depositado en vertederos, donde generalmente no se gestionan para su reutilización. También disminuye la necesidad de extraer agregados vírgenes y, en algunos casos, reduce las distancias de transporte de los agregados al sitio de obra, que también es una actividad importante de lo cual se deriva gran cantidad de contaminación.

Esta empleabilidad en capas de pavimentos crea economías circulares y genera espacios de nuevos mercados de acuerdo a la cadena productiva de la cual se compone la creación de los agregados reciclados, permitiendo así el crecimiento de economía locales.

La incorporación de RCD en la construcción de infraestructuras viales en zonas donde los recursos son limitados, es una opción viable, que amplía la conectividad entre lugares de difícil acceso y fomenta un desarrollo que además se relaciona con las intenciones nacionales e internacionales de sostenibilidad.

Los costos relacionados a la construcción de un pavimento con AR son similares a los reportados para una estructura compuestas por agregados naturales de calidad adecuada.

La implementación de agregados reciclados en actividades constructivas permite la incorporación de nuevos parámetros técnicos, lo que puede dar lugar a productos con tecnologías innovadoras y ofrecer grandes beneficios.

Es crucial desarrollar planes estratégicos para la deconstrucción de obras, de modo que la obtención de residuos de construcción y demolición no comprometa sus propiedades.

## 6. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Basado en el análisis realizado, se pueden proponer recomendaciones para futuros estudios que servirán para ampliar el conocimiento sobre el tema de investigación.

Se sugiere monitorear el comportamiento del material a largo plazo, pues, aunque los resultados de este estudio revelan resultados positivos en cuanto a sus características físicas y mecánicas, es importante realizar evaluaciones adicionales enfocadas a medir su desempeño en condiciones de desgaste a lo largo del tiempo. Esto es especialmente importante dado que se trata de un material no convencional, cuyo comportamiento a futuro podría ser desconocido.

Es importante evaluar el comportamiento de materiales provenientes de diversas fuentes, considerando variables como los componentes de los agregados reciclados, la antigüedad de la obra demolida y las condiciones a las que han estado expuestos. Esto permitirá determinar en qué medida estas condiciones afectan el desempeño de cada tipo de agregado.

Se recomienda realizar un análisis microscópico para comprender el comportamiento de los agregados reciclados tras su hidratación. Este análisis ayudará a determinar por qué la resistencia del material inicialmente aumenta, luego disminuye y finalmente vuelve a aumentar al entrar en contacto con agua. Además, es importante evaluar su solidez frente a los efectos percibidos en la simulación del intemperismo para identificar su desempeño bajo estas condiciones.

Realizar un estudio que tenga relación con la medición de la huella de carbono generada por la implementación de AR en actividades de construcción civil y compararla con la generada por agregados convencionales en el mismo uso y así determinar de manera más detallada cuales con los efectos ambientales derivados de esta implementación.

Realizar nuevamente todos los ensayos de caracterización ejecutados en esta investigación para los agregados reciclados, eliminando el ladrillo de su composición para evaluar posibles mejoras en ciertas propiedades.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Abedin Khan, Z., Balunaini, U., & Costa, S. (2024). Environmental feasibility and implications in using recycled construction and demolition waste aggregates in road construction based on leaching and life cycle assessment – A state-of-the-art review. *Cleaner Materials*, 12, 100239. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2024.100239>

Agarwal, A., Ramana, G. V., Datta, M., Soni, N. K., & Satyakam, R. (2022). Environmental assessment of unprocessed sand-sized construction & demolition waste for geotechnical reuse. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132504. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.132504>

Alcaldía de Barranquilla. (2017). Por medio de la cual se establece la obligatoriedad de la presentación del programa de uso eficiente y ahorro del agua a las entidades encargadas de la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico. Resolución 1482 de 2017

Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. (1997). Por el cual se regula el manejo, transporte y disposición final de escombros y materiales de construcción. Decreto 357 de 1997

Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. (2015). Por medio del cual se adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los Residuos de Construcción y Demolición - RCD en Bogotá D.C. Decreto 586 de 2015

Alvarez, A. E., Espinosa, L. V, Ortiz, P. A., Hurtado, M. D., Cotes, L. E., & López, Y. M. (2019). Evaluación de la degradación por compactación de materiales granulares tipo subbase. *Revista EIA*, 16(31), 13-25. <https://doi.org/10.24050/reia.v16i31.746>

Amorim, E. F., Ribeiro, L. F. M., & SANTOS, J. (2023). EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA EN MEZCLAS DE SUELO Y RCD APLICADO EN

OBRAS DE PAVIMENTACIÓN. En *Tecnologia em Controle de Obras: 20 anos de contribuições do IFMT para construção civil* (pp. 444-462). Editora Científica Digital. <https://doi.org/10.37885/230512981>

Bagarić, M., Banjad Pečur, I., & Milovanović, B. (2020). Hygrothermal performance of ventilated prefabricated sandwich wall panel from recycled construction and demolition waste – A case study. *Energy and Buildings*, 206, 109573. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109573>

Bastidas-Martínez, J. G., Reyes-Lizcano, F. A., & Rondón-Quintana, H. A. (2022). Use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures for pavements: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), 725-741. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2022.08.001>

Beja, I. A., Motta, R., & Bernucci, L. B. (2020). Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil. *Construction and Building Materials*, 258, 119520. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119520>

Bordoloi, S., Afolayan, O., Ng C.W.W . (2022). Feasibility of construction demolition waste for unexplored geotechnical and geo-environmental applications- a review. *Construction and Building Materials*, 356, 129230. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129230>

Borges, P. M., Schiavon, J. Z., da Silva, S. R., Rigo, E., Neves Junior, A., Possan, E., & Andrade, J. J. de O. (2023). Mortars with recycled aggregate of construction and demolition waste: Mechanical properties and carbon uptake. *Construction and Building Materials*, 387, 131600. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131600>

Caro, D., Lodato, C., Damgaard, A., Cristóbal, J., Foster, G., Flachenecker, F., & Tonini, D. (2024). Environmental and socio-economic effects of construction and demolition waste recycling in the European Union. *Science of The Total Environment*, 908, 168295. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.168295>

Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC). (2022). PLAN DE MANEJO DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA DEMOLICIÓN. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción.

Cochran, K., Townsend, T., Reinhart, D., & Heck, H. (2007). Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition: Case study for Florida, US. *Waste Management*, 27(7), 921-931. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2006.03.023>

Comisión Europea. (2016). Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE. Comisión Europea

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA). (2002). diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. CONAMA N° 307

Contreras, M., Teixeira, S. R., Lucas, M. C., Lima, L. C. N., Cardoso, D. S. L., da Silva, G. A. C., Gregório, G. C., de Souza, A. E., & dos Santos, A. (2016). Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). *Construction and Building Materials*, 123, 594-600. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.044>

Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA). (2018). POR EL CUAL SE REGLAMENTA EL CONTROL A LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN – RCD EN SANTIAGO DE CALI Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES. Decreto 0771 de 2018

Federal Highway Administration (FHWA). (2008). Directrices para el uso de materiales de desecho y subproductos en la construcción de pavimentos. FHWA-RD-97-148

García, F., (2023). *EVALUACIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) DE LA CIUDAD DE CALI UTILIZADOS COMO*

AGREGADOS PARA CAPAS DE BASE Y SUB-BASE EN PAVIMENTOS.  
Universidad del Cauca

Garzón, E., Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarreal, L., & Sánchez-Soto, P. J. (2022). Assessment of construction and demolition wastes (CDWs) as raw materials for the manufacture of low-strength concrete and bases and sub-bases of roads. *Materials Letters*, 320, 132343. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2022.132343>

Gómez, A., & Farias, M. (2012). *Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y demolición en la estructura de pavimento Physical and mechanical behavior of a construction and demolition waste for use in pavement structure.*

Gurumallappa, P., Gowda, S., Ganesh, B., Abhishek, K., & Joshi, A. (2023). International conference on material science and computational engineering recycled aggregate from construction and demolition waste as resource for concrete – A product initiative. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.01.150>

HaitherAli, H., & G, A. (2024). Sustainable urban development: Evaluating the potential of mineral-based construction and demolition waste recycling in emerging economies. *Sustainable Futures*, 7, 100179. <https://doi.org/10.1016/J.SFTR.2024.100179>

Hao, J. L., Yu, S., Tang, X., & Wu, W. (2022). Determinants of workers' pro-environmental behaviour towards enhancing construction waste management: Contributing to China's circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133265. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133265>

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2018). BASE Y SUBBASE GRANULAR PARA VÍAS VEHICULARES CON AGREGADOS RECICLADOS OBTENIDOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN RCD. Especificación 511 de 2018

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2018). SUBBASE GRANULAR PARA VÍAS PEATONALES Y CICLORUTAS CON AGREGADOS RECICLADOS OBTENIDOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN RCD. Especificación 513 de 2018

Instituto nacional de vías (INVIAS). (2022). Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. Instituto nacional de vías (INVIAS)

Ji, Y., & Wang, D. (2023). Constitutive model of waste brick concrete based on Weibull strength theory. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01738. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01738>

Jimenez, E., García, H. (2016). *Aprovechamiento de los RCD en proyectos de construcción y conservación de pavimentos urbanos. Universidad Católica de Colombia.*

Jimenez, L., Trochez, N, Díaz, Y (2019). Estudio para aprovechamiento de RCD en Santiago de Cali como agregado en materiales de construcción. Bistua: Revista de la Facultad de *Ciencias Básicas* (Vol. 17, Número 1).

Kim, G. M., Adem, J. K., & Park, S. (2024). Reaction and microstructural characteristics of OPC pastes with low-lime calcium silicate cements under carbonation curing. *Construction and Building Materials*, 415, 134993. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.134993>

Kumar, P., & Shukla, S. (2022). Flexible pavement construction using different waste materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1697-1702. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.04.713>

Kuttah, D. (2023). Recycling of industrial and construction waste materials in roads construction. *International Journal of Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19386362.2023.2239684>

Latorre, L. (2017). *INTEGRAL MANAGEMENT OF SUSCEPTIBLE USABLE RESIDUES GENERATED IN COLOMBIAN ROADS CONSTRUCTION*. Universidad Militar Nueva Granada

Leite, F. D. C., Motta, R. D. S., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2972-2979. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.11.105>

Liu, L., Li, Z., Cai, G., Zhang, J., & Dai, B. (2022). Long-term performance of temperature and humidity in the road embankment constructed with recycled construction and demolition wastes. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131851. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131851>

Ma, W., & Hao, J. L. (2024). Enhancing a circular economy for construction and demolition waste management in China: A stakeholder engagement and key strategy approach. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141763. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.141763>

Marián, D., Monercillo, B., García, A. (2011). *Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición*. Fundación Laboral de la Construcción (España)

Mejía, E., Osorno, L., Osorio, N. (2015). *RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN: UNA OPCIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS*. Revista EIA. <https://doi.org/10.14508/reia.2014.11.E2.55-60>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de Construcción y Demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones. Resolución 0472 de 2017

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Por la cual se modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y se adoptan otras disposiciones. Resolución 1257 de 2021

Ministerio de Vivienda, ciudad y territorio. (2013). Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo. Decreto 2981 de 2013

Muñoz, P. A., Imbachí, S. C., & Flórez, J. F. (2014). Obstacle detection system with Scanner. *ingeniería y desarrollo*, 32(2), 200-217. <https://doi.org/10.14482/inde.32.2.5406>

Muñoz, S., Díaz, D., Gamarra, E., Chaname, A. (2021). La Influencia de los RCD en reemplazo de los agregados para la elaboración de concreto: Una revisión de la literatura. *Ecuadorian Science Journal*, 5(2), 107-120. <https://doi.org/10.46480/esj.5.2.111>

NORMA BRASILEIRA. (2004). Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. NBR 15115 de 2004

NORMA BRASILEIRA. (2004). Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensayos. NBR 15116 de 2004

Norma Oficial Mexicana (NOM). Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. NOM-161-SEMARNAT de 2011

Norma Técnica colombiana (NTC). (1997). Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural. NTC 4026:1997

Norma Técnica colombiana (NTC). (2017). Unidades de concreto para mampostería no estructural. NTC 4076:2017

Norma Técnica colombiana (NTC). (2018). Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174:2018

Norma Técnica colombiana (NTC). (2021). Agregados gruesos reciclados para uso en el concreto hidráulico. NTC 6421:2021

Norma Técnica colombiana (NTC). (2021). Ensayo de clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados. NTC 6422:2021

Norma Técnica colombiana (NTC). (2023). Práctica para la recuperación de material de base de agregados reciclados. NTC 6656:2023

Núñez, H. (2023). Policía y Plan Jarillón trabajan articulados contra la disposición inadecuada de residuos. Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA).

Oviedo Cogollo, A. R., & Vega Suárez, J. C. (2022). Manejo de residuos de construcción y demolición y economía circular: una revisión narrativa. *Lámpsakos*, 26. <https://doi.org/10.21501/21454086.4232>

Peña, S., Terán, P., Molina, J., Cañola, H., Builes, A., Zuluaga, J. (2018). Evaluación de las propiedades de residuos de construcción y demolición de concreto para su uso en la elaboración de sub-bases granulares. Una alternativa al manejo de residuos en el Valle de Aburrá. *Cuaderno Activa*, 10(1), 79 - 90. REVISTA CIENTÍFICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Pourkhorshidi, S., Sangiorgi, C., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2020). Using Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Unbound Layers of Pavements. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Número 22, pp. 1-20). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su12229386>

Quintero, C. (2022). Caracterización en el diseño de pavimentos utilizando como material sostenible agregados pétreos y RCD en vías terciarias. Universidad Católica de Colombia

Quiñones, F. (2014). *APLICABILIDADE DE RESÍDUOS RECICLADOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO AGREGADOS EM MISTURAS ASFÁLTICAS*. Universidade de Brasília faculdade de tecnologia departamento de engenharia civil e ambiental

Rodríguez, F., Terán, C. (2018). *Formulación de un plan de gestión para el uso de agregados de concreto reciclado en concretos hidráulicos para una empresa constructora en la ciudad de Bogotá*. Universidad Católica de Colombia

Rodríguez Guerra, A., & Baca-Cajas, K. A. (2022). Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU): análisis de una década de gestión en países de Europa y América. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 43(1). <https://doi.org/10.26807/remcb.v43i1.919>

Santos, R. P., & Tubino, R. (2021). Potential evaluation of the use of construction and demolition waste (CDW) in the recovery of degraded soils by mining in Brazil. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 12, 200060. <https://doi.org/10.1016/J.RCRADV.2021.200060>

Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital. Resolución 2397 de 2011

Secretaría Distrital de Ambiente. (2012). Por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital. Resolución 1115 de 2012

Secretaría Distrital de Ambiente. (2015). Por medio del cual se adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los Residuos de Construcción y Demolición - RCD en Bogotá D.C. Decreto 586 de 2015

Secretaría Distrital de Ambiente. (2015). Por la cual se Modifica y Adiciona la Resolución 1115 de 2012. Resolución 0932 de 2015

Secretaría Distrital de Ambiente. (2023). Por el cual se adopta el modelo y los lineamientos para la gestión integral de los Residuos de Construcción y Demolición - RCD en Bogotá D.C., y se dictan otras disposiciones. Decreto 507 de 2023

SHELL International Petroleum Company Shell Pavement. (1978). Design Manual – Asphalt Pavement and Overlays for Road Traffic. SHELL International Petroleum Company Shell Pavement

Trujillo, K., Quintero, A. (2021). *Análisis del manejo de Residuos de Construcción y Demolición RCD y sostenibilidad en la construcción en Bogotá D.C.* Ciencia. Unisalle [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil)

Una Norma Española (UNE). (2009). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. UNE-EN 933-11:2009/AC:2010

Una Norma Española (UNE). (2009). Áridos para hormigón. UNE-EN 12620:2003+A1:2009

Una Norma Española (UNE). (2003). Áridos para morteros. UNE-EN 13139:2003

Una Norma Española (UNE). (2008). Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes. UNE-EN 13242:2003+A1:2008

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP). 2024. Solicitud Residuos de Construcción y Demolición - RCD domiciliario. Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP)

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Semiannual Report to Congress. EPA-350-R-18-003

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Construction and Demolition Debris: Material-Specific Data. Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling

Vegas, I., Ibañez, J. A., Lisbona, A., Sáez De Cortazar, A., & Frías, M. (2011). Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2674-2682. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.12.018>

Wang, C., Chazallon, C., Jing, P., Hornych, P., & Latour, B. (2023). Effect of self-cementing properties on the mechanical behaviour of recycled concrete aggregates in unbound pavement layers. *Transportation Geotechnics*, 42, 101054. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2023.101054>

Yaghoubi, E., Sudarsanan, N., & Arulrajah, A. (2021). Stress-strain response analysis of demolition wastes as aggregate base course of pavements. *Transportation Geotechnics*, 30, 100599. <https://doi.org/10.1016/J.TRGEO.2021.100599>

Zeghal, M. (2009). The impact of grain crushing on road performance. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(4), 549-558. <https://doi.org/10.1007/s10706-009-9256-1>

Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., & Tukker, A. (2022). An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of The Total Environment*, 803, 149892. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.149892>

Zhang, Y., Cetin, B., & Edil, T. B. (2021). Seasonal performance evaluation of pavement base using recycled materials. *Sustainability (Switzerland)*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/su132212714>

## ANEXOS

### *Anexo 1. Resumen Resultados de ensayos de caracterización del AR*

CARACTERÍSTICA	ENSAYO		NORMA INV 2022	VALOR PARA MATERIAL DE AR
DUREZA	Desgaste en la Máquina de los Ángeles (Gradación A) (%)	500 revoluciones	E-218	42
		100 revoluciones		11
	Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos - Valor en seco (kN)		E-224	70.7
DURABILIDAD	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio - AR con ladrillo (%)	Agregado grueso	E-220	12
		Agregado fino		37
	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de	Agregado grueso	E-220	4

	magnesio - AR sin ladrillo (%)	Agregado fino		39
LIMPIEZA	Límite líquido (%)		E-125	29
	Índice de plasticidad (%)		E-125 y E-126	8
	Equivalente de arena (%)		E-133	39
	Valor de azul de metileno		E-235	6.9
	Contenido de terrones de arcilla y partículas delezna- bles (%)	Gruesos	E-211	1
		Finos		1
GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS	Índice de alargamiento y aplanamiento (%)	Índice de alargamiento	E-230	18
		Índice de aplanamiento		18
	Caras fracturadas (%)	Una cara	E-227	97
		Dos caras		81
	Angularidad de la fracción fina (%)		E-239	45.4
RESISTENCIA DEL MATERIAL	CBR (%)		E-148	54.0

DENSIDAD GRUESOS	Densidad	Gravedad específica en condición seca al horno	E-223	2080
		Gravedad específica en condición saturada y superficialmente seca		2242
		Gravedad específica aparente		2482
	Absorción (%)	7.8		
DENSIDAD FINOS	Densidad	Gravedad específica en condición seca al horno	E-222	2210
		Gravedad específica en condición saturada y superficialmente seca		2401
		Gravedad específica aparente		2731
	Absorción (%)	8.6		

CARACTERIZACIÓN	Cantidad de material que pasa el tamiz de 75 $\mu\text{m}$ (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado (%)	E-214	6.4
CARACTERIZACIÓN	Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino	E-213	Grava bien gradada con finos arcillosos (GW-GC).
CARACTERIZACIÓN	Determinación de componentes del AR	NA	54.9% Concreto, 21.2% agregado, 12.4% mortero, 8.3% ladrillo, 2.5% cerámica, 0.6% asfalto y 0.06% vidrio.

CARACTERIZACIÓN	Relaciones humedad – Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)	E-142	Densidad seca máxima de 1.890 g/cm <sup>3</sup> y porcentaje de humedad de 14.5%.
-----------------	---	-------	---

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 2. Ensayo modificado de compactación*

<b>Prueba No.</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>No. de golpes</b>	56	56
<b>Humedad deseada (%)</b>	13,0	16,0
<b>Humedad Inicial de la muestra (%)</b>	6,2	6,2
<b>Humedad adicional (%)</b>	6,8	9,8
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	7.000	7.000
<b>Peso muestra seca (g)</b>	6.592	6.592
<b>Agua adicional (cm<sup>3</sup>)</b>	448	646
<b>Molde No.</b>	26	26
<b>Peso muestra húmeda más molde (g)</b>	9.625	9.655
<b>Peso molde (g)</b>	5.080	5.080
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.545	4.575
<b>Humedad de horno (%)</b>	13,5	18,5
<b>Peso muestra seca (g)</b>	4.004	3.862
<b>Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2.123,00	2.123,00
<b>Peso específico seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,886	1,819

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 3. Medición de CBR del AR: Datos y resultados de moldes para PM*

<b>Prueba No.</b>	1	2	3
<b>No. de golpes</b>	56	25	10
<b>Humedad deseada (%)</b>	14,5	14,5	14,5
<b>Humedad Inicial de la muestra (%)</b>	7,5	7,5	7,5
<b>Humedad adicional (%)</b>	7,0	7,0	7,0
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	7.000	7.000	7.000
<b>Peso muestra seca (g)</b>	6.512	6.512	6.512
<b>Agua adicional (cm<sup>3</sup>)</b>	455,8	455,8	455,8
<b>Molde No.</b>	26	42	28
<b>Peso muestra húmeda más molde (g)</b>	9.655	9.150	8.785
<b>Peso molde (g)</b>	5.080	4.680	4.615
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.575	4.470	4.170
<b>Humedad de horno (%)</b>	14,5	14,5	14,5
<b>Peso muestra seca (g)</b>	3.996	3.904	3.642
<b>Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2.123	2.123	2.123
<b>Densidad muestra seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,882	1,839	1,715

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 4. Medición de CBR del AR: Humedad de compactación para moldes*

<b>No. de golpes</b>	10	25	56
<b>P1</b>	723,6	555,4	350,6
<b>P2</b>	649,7	496,8	312,4
<b>P3</b>	62,6	59,3	62,0
<b>Humedad de compactación (%)</b>	12,6	13,4	15,3

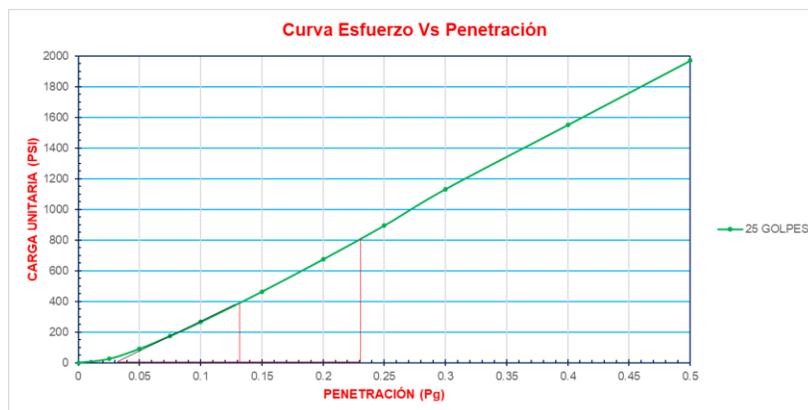
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 5. Medición de CBR del AR: CBR antes de corregir

Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio sin corregir)									
Molde No.	28			42			26		
No. Golpes	10			25			56		
Días inmersión	1			1			1		
Expansión (in)	2			0			0		
Penetración (in)	Lectura	Presión (psi)	CBR	Lectura	Presión (psi)	CBR	Lectura	Presión (psi)	CBR
0	0	0	-	0	0	-	0	0	-
0,025	33	80,85		10	24,5		7	17,15	
0,05	55	134,75		37	90,65		23	56,35	
0,075	76	186,2		71	173,95		42	102,9	
0,1	97	237,65	24%	108	264,6	26%	69	169,05	17%
0,15	138	338,1	-	189	463,05	-	136	333,2	-
0,2	176	431,2	29%	275	673,75	45%	217	531,65	35%
0,25	215	526,75	-	365	894,25	-	308	754,6	-
0,3	251	614,95	32%	462	1.131,9	60%	412	1.009,4	53%
0,4	330	808,5	32%	633	1.550,85	62%	622	1.523,9	61%
0,5	390	955,5	37%	804	1.969,8	76%	780	1.911	74%
%W penetración	13,8			13,0			12,8		
Constante anillo (psi)	2,45								
Nota: Peso de sobrecargas: 4,54 kg (10lb)									

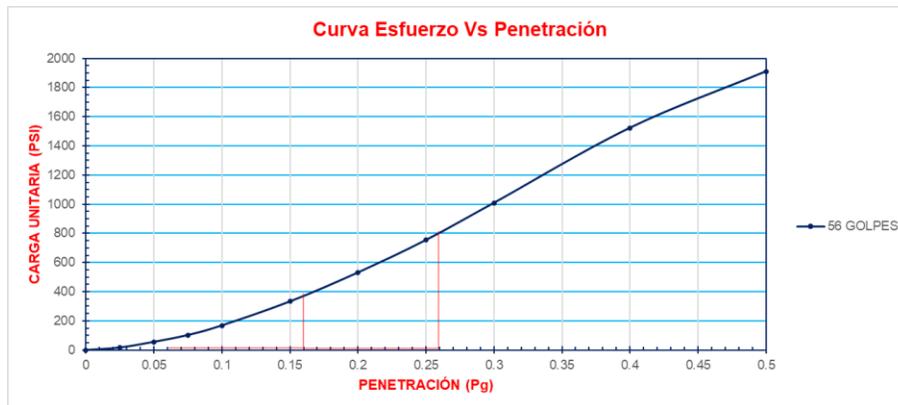
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 6. Medición de CBR del AR: Curva esfuerzo vs Penetración de AR para CBR sin corregir (25 Golpes)



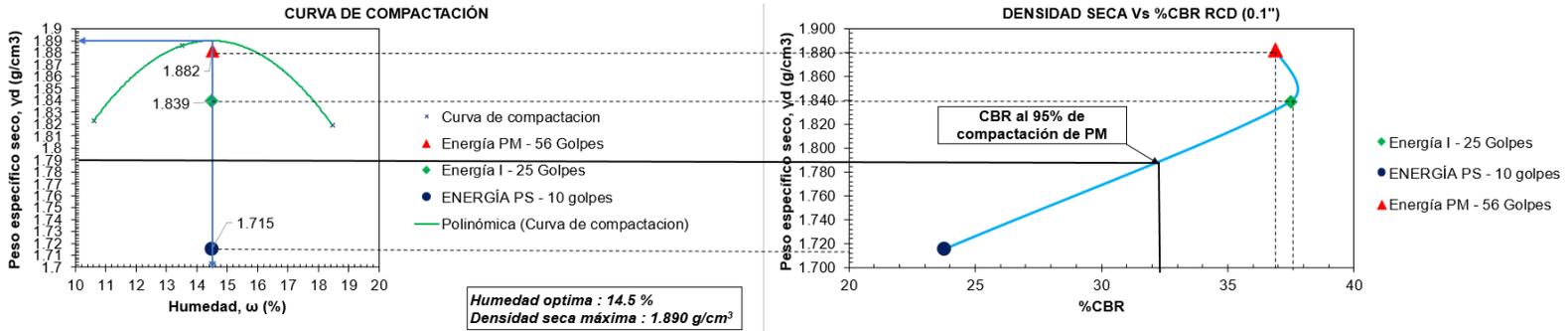
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 7. Medición de CBR del AR: Curva esfuerzo vs Penetración de AR para CBR sin corregir (56 Golpes)



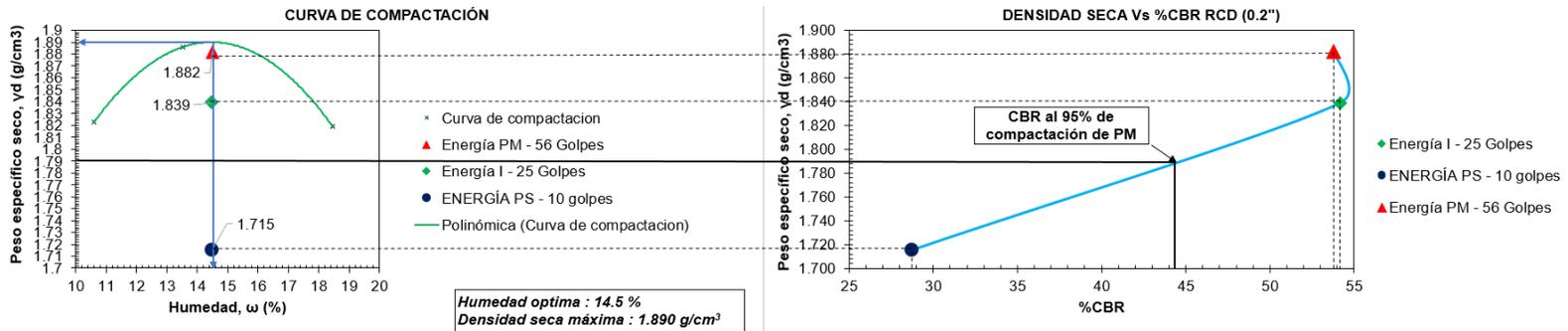
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 8. Medición de CBR del AR: Densidad Seca vs %CBR AR al 95% PM (0,1")



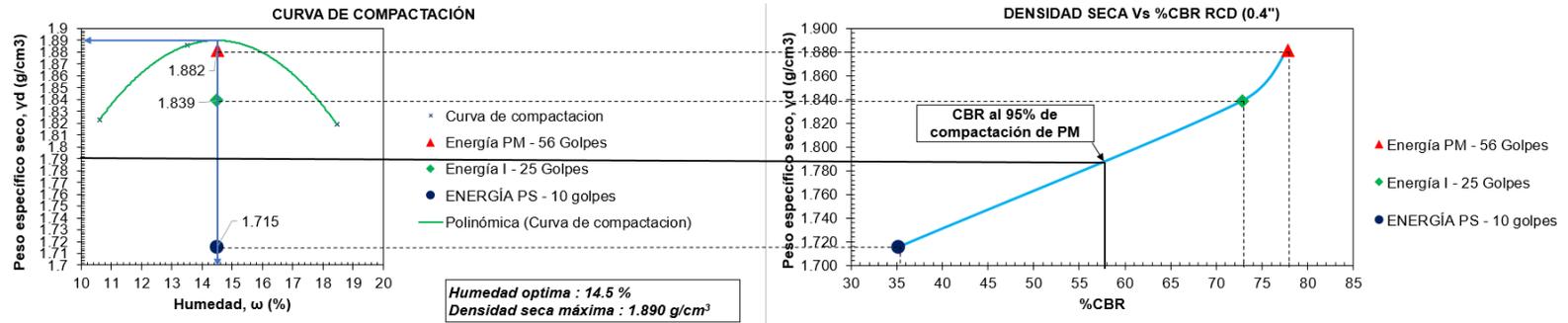
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 9. Medición de CBR del AR: Densidad Seca vs %CBR AR al 95% PM (0,2")



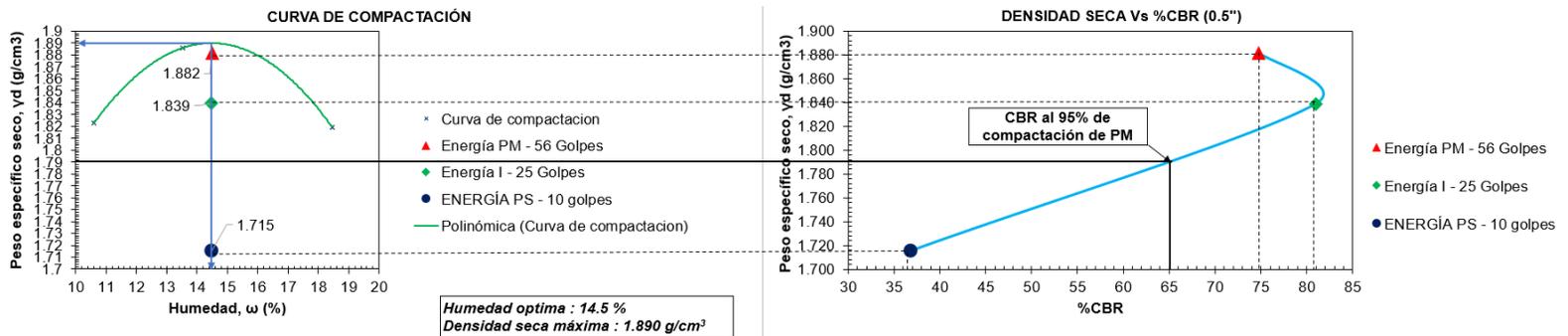
Fuente: Elaboración propia de la autora.

### Anexo 10. Medición de CBR del AR: Densidad Seca vs %CBR AR al 95% PM (0,4")



Fuente: Elaboración propia de la autora.

### Anexo 11. Medición de CBR del AR: Densidad Seca vs %CBR AR al 95% PM (0,5")



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 12. Medición de crecimiento de CBR en el tiempo: Peso de fracciones para una submuestra de 6.000g con gradación SBG-50 para PM

<b>SBG-50</b>					
<b>Cálculo por espécimen de 6000 g</b>					
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa promedio</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Nuevo % retenido</b>	<b>Cálculo por espécimen de (6000 g)</b>
1/2"	12,5	60	8	12	690
3/8"	9,5	55	5	7	442
No. 4	4.,75	40	15	22	1.327
No. 10	2,00	27,5	13	18	1.106
No. 40	0,425	15,5	12	18	1.062
No. 200	0,075	8,5	7	10	619
Pasa 200	-	-	9	13	752
Total			68	100	6.000

Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 13. Medición de crecimiento de CBR en el tiempo: Peso de fracciones para una submuestra de 4500g con gradación SBG-50 para PM

<b>SBG-50</b>					
<b>Cálculo por espécimen de 4500g</b>					
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa Promedio</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Nuevo % Retenido</b>	<b>Cálculo por espécimen de (4500g)</b>
1/2"	12,5	60	8	12	518
3/8"	9,5	55	5	7	332
No. 4	4,75	40	15	22	996
No. 10	2,00	27,5	13	18	830
No. 40	0,425	15,5	12	18	796
No. 200	0,075	8,5	7	10	465
Pasa 200	-	-	9	13	564
Total			68	100	4.500

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 14. Medición de crecimiento de CBR en el tiempo: Ensayo modificado de compactación para AR como SBG-50*

<b>Prueba No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>No. de golpes</b>	56	56	56
<b>Humedad deseada (%)</b>	10,0	13,0	16,0
<b>Humedad Inicial de la muestra (%)</b>	0,0	0,0	0,0
<b>Humedad adicional (%)</b>	10,0	13,0	16,0
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	6.000	4.500	4.500
<b>Peso muestra seca (g)</b>	6.000	4.500	4.500
<b>Agua adicional (cm<sup>3</sup>)</b>	600	585	720
<b>Molde No.</b>	23	35	24
<b>Peso muestra húmeda más molde (g)</b>	9.140	9.020	9.460
<b>Peso molde (g)</b>	5.020	4.645	5.000
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.120	4.375	4.460
<b>Humedad de horno (%)</b>	8,6	11,6	15,6
<b>Peso muestra seca (g)</b>	3.793	3.920	3.858
<b>Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2.123	2.123	2.123
<b>Peso específico seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,786	1,846	1,817

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 15. Medición de crecimiento de CBR en el tiempo: Datos y resultados moldes PM para CBR de SBG-50*

<b>Prueba No.</b>	1	2	3
<b>No. de golpes</b>	10	25	56
<b>Humedad deseada (%)</b>	12,7	12,7	12,7
<b>Humedad Inicial de la muestra (%)</b>	0,0	0,0	0,0
<b>Humedad adicional (%)</b>	12,7	12,7	12,7
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.500	4.500	4.500
<b>Peso muestra seca (g)</b>	4.500	4.500	4.500
<b>Agua adicional (cm<sup>3</sup>)</b>	571,5	571,5	571,5
<b>Molde No.</b>	29	15	19
<b>Peso muestra húmeda más molde (g)</b>	9.305	8.435	8.610
<b>Peso molde (g)</b>	5.065	4.145	4.090
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.240	4.290	4.520
<b>Humedad de horno (%)</b>	12,7	12,7	12,7
<b>Peso muestra seca (g)</b>	3.762	3.807	4.011
<b>Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2.123	2.123	2.123
<b>Densidad muestra seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,772	1,793	1,889

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 16. Medición de crecimiento de CBR en el tiempo: Humedad de compactación moldes para CBR de SBG-50*

<b>No. de golpes</b>	10	25	56
<b>P1</b>	408,6	520,6	485,4
<b>P2</b>	368,9	469,4	437,7
<b>P3</b>	42,6	43,4	40,3
<b>Humedad de compactación (%)</b>	12,2	12,0	12,0

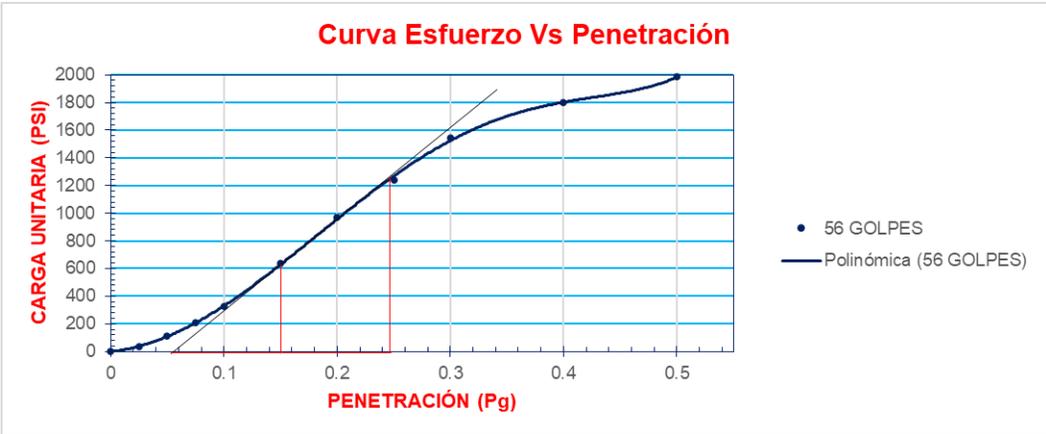
Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 17. Medición de crecimiento de CBR en el tiempo: CBR del AR antes de corregir para SBG-50*

Relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio sin corregir)									
<b>Molde No.</b>	29			15			19		
<b>No. Golpes</b>	10			25			56		
<b>Días inmersión</b>	4			4			4		
<b>Expansión (in)</b>	0,17			0,20			0,17		
<b>Penetración (in)</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>	<b>Lectura</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>CBR</b>
<b>0</b>	0	0	-	0	0	-	0	0	-
<b>0,025</b>	23	56,35		23	56,35		15	36,75	
<b>0,05</b>	58	142,1		44	107,8		45	110,25	
<b>0,075</b>	95	232,75		79	193,55		84	205,8	
<b>0,1</b>	131	320,95	32%	106	259,7	26%	133	325,85	33%
<b>0,15</b>	183	448,35	-	172	421,4	-	260	637	-
<b>0,2</b>	234	573,3	38%	236	578,2	39%	395	967,75	65%
<b>0,25</b>	284	695,8	-	337	825,65	-	505	1.237,25	-
<b>0,3</b>	342	837,9	44%	463	1134,35	60%	631	1.545,95	81%
<b>0,4</b>	430	1053,5	46%	554	1357,3	59%	734	1.798,3	78%
<b>0,5</b>	510	1249,5	48%	750	1837,5	71%	810	1.984,5	76%
<b>%W penetración</b>	13,7			15,0			12,3		
<b>Constante anillo (psi)</b>	2,45								
Nota: Peso de sobrecargas: 4,54 kg (10lb)									

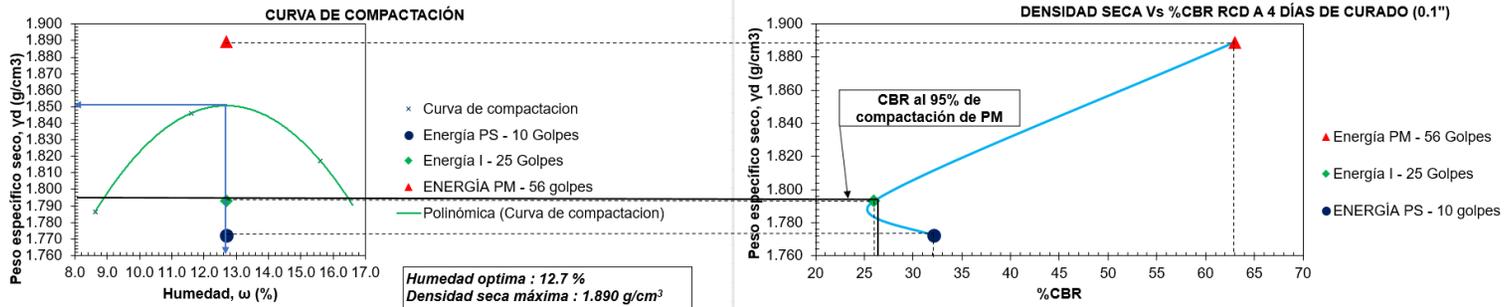
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 18. Medición del crecimiento de CBR en el tiempo: Curva esfuerzo vs Penetración de RCD como SBG-50 para CBR sin corregir (56 Golpes) a 4 días de curado



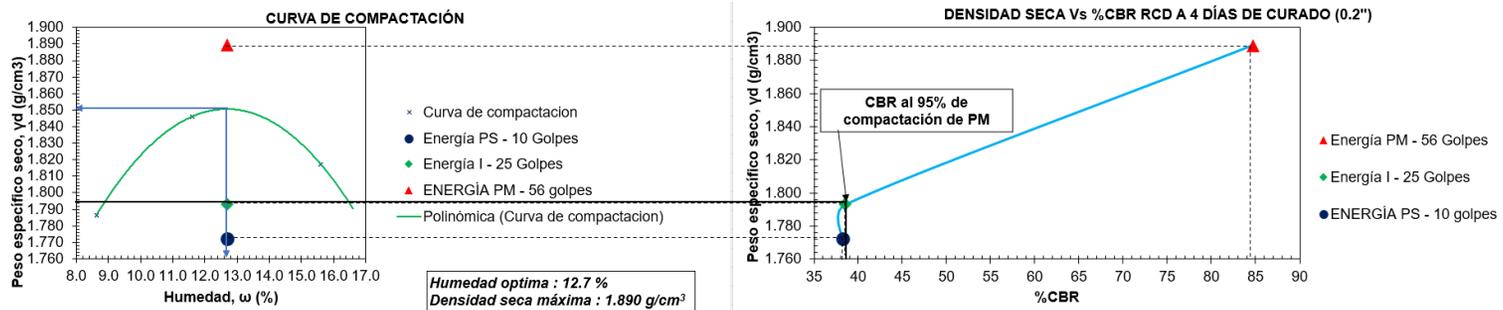
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 19. Densidad Seca vs %CBR (0,1") de AR como SBG-50 a 4 días de curado



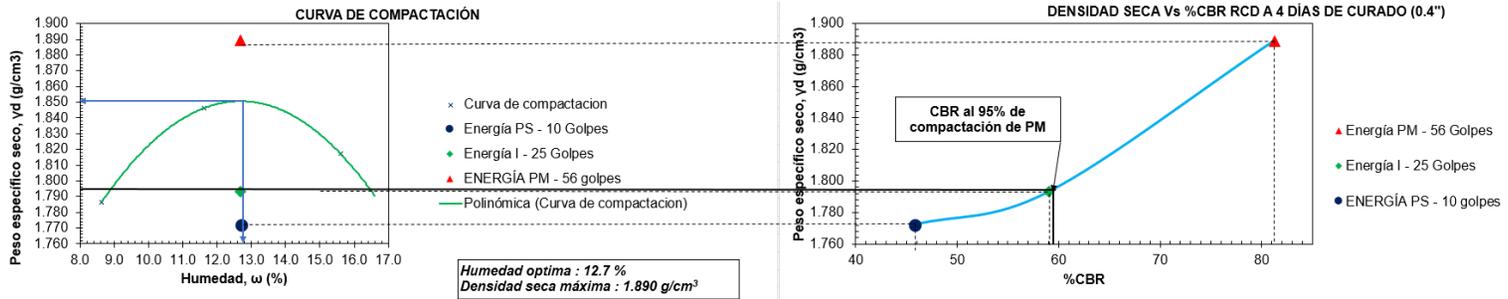
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 20. Densidad Seca vs %CBR (0,2") de AR como SBG-50 a 4 días de curado



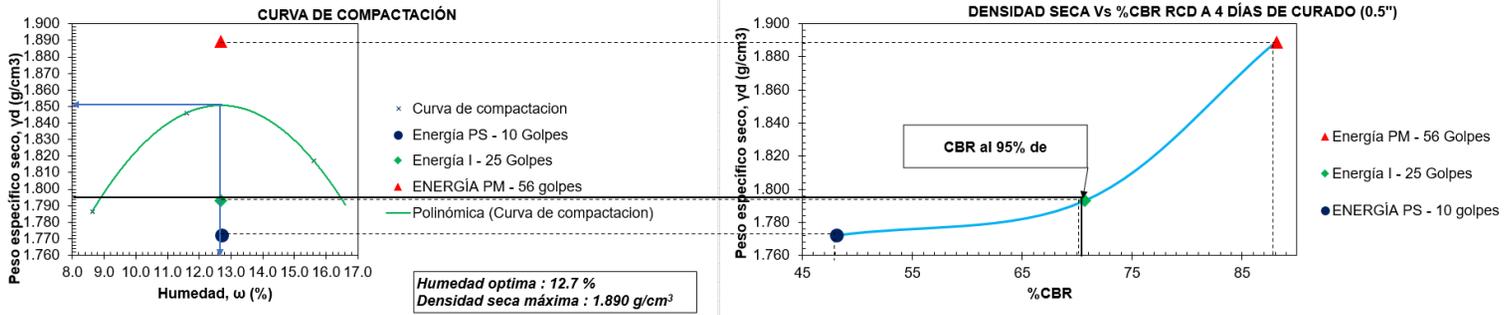
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 21. Densidad Seca vs %CBR (0,4") de AR como SBG-50 a 4 días de curado



Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 22. Densidad Seca vs %CBR (0,5") de AR como SBG-50 a 4 días de curado



Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 23. Medición del crecimiento de CBR en el tiempo: Muestra SBG-50 con partículas retenidas en tamiz de ¾" y cantidades superiores reemplazadas*

<b>SBG-50</b>							
No. Tamiz	Tamiz (mm)	%Pasa		% Pasa promedio	% Retenido	% Retenido acumulado	Cálculo por espécimen de (4500g)
		Límite inferior	Límite superior				
2"	50,0	100	100	100	0	0,0	0
1 1/2"	37,5	70	95	83	18	17,5	788
1"	25,0	60	90	75	8	25,0	338
¾"	19,0	53	83	68	7	32,2	324
1/2"	12,5	45	75	60	8	40,0	351
3/8"	9,5	40	70	55	5	45,0	225
No. 4	4,75	25	55	40	15	60,0	675
No. 10	2,00	15	40	28	13	72,5	563
No. 40	0,425	6	25	16	12	84,5	540
No. 200	0,075	2	15	8,5	7	91,5	315
Pasa 200	-	-	-	-	8,5	100,0	383
Total					100		4.500

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 24. Medición del crecimiento de CBR en el tiempo: Muestra SBG-50 con cantidad de partículas que se deben reemplazar para pasante de ¾"*

<b>SBG-50</b>							
No. Tamiz	Tamiz (mm)	%Pasa		% Pasa promedio	% Retenido	% Retenido acumulado	Cálculo por espécimen de (5212g)
		Límite inferior	Límite superior				
2"	50,0	100	100	100	0	0,0	0
1 1/2"	37,5	70	95	83	18	17,5	912
1"	25,0	60	90	75	8	25,0	391
¾"	19,0	53	83	68	7	32,2	375
1/2"	12,5	45	75	60	8	40,0	407
3/8"	9,5	40	70	55	5	45,0	261
No. 4	4,75	25	55	40	15	60,0	782

No. 10	2,00	15	40	28	13	72,5	652
No. 40	0,425	6	25	16	12	84,5	625
No. 200	0,075	2	15	8.5	7	91,5	365
Pasa 200	-	-	-	-	8,5	100,0	443
Total					100		5.212

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 25. Medición del crecimiento de CBR en el tiempo: Cantidades para cada espécimen para CBR de RCD como SBG-50*

<b>SBG-50</b>		
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>Cantidad para cada espécimen para CBR</b>
2"	50,0	0
1 1/2"	37,5	0
1"	25,0	0
3/4"	19,0	0
1/2"	12,5	758
3/8"	9,5	486
No. 4	4,75	1.457
No. 10	2,00	563
No. 40	0,425	540
No. 200	0,075	315
Pasa 200	-	382,5
Total		4.500

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 26. Medición del crecimiento de CBR en el tiempo: Datos de PM para CBR de SBG-50 a 28 días de curado*

<b>Prueba No.</b>	1	2	3
<b>No. de golpes</b>	10	25	56
<b>Humedad deseada (%)</b>	12,7	12,7	12,7
<b>Humedad Inicial de la muestra (%)</b>	0,0	0,0	0,0
<b>Humedad adicional (%)</b>	12,7	12,7	12,7
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.500	4.500	4.500
<b>Peso muestra seca (g)</b>	4.500	4.500	4.500
<b>Agua adicional (cm<sup>3</sup>)</b>	571,5	571,5	571,5
<b>Molde No.</b>	28	2	35
<b>Peso muestra húmeda más molde (g)</b>	8.860	8.325	9.180
<b>Peso molde (g)</b>	4.615	4.025	4.645
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.245	4.300	4.535
<b>Humedad de horno (%)</b>	12,7	12,7	12,7
<b>Peso muestra seca (g)</b>	3.767	3.815	4.024
<b>Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2.123	2.123	2.123
<b>Densidad muestra seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,774	1,797	1,895

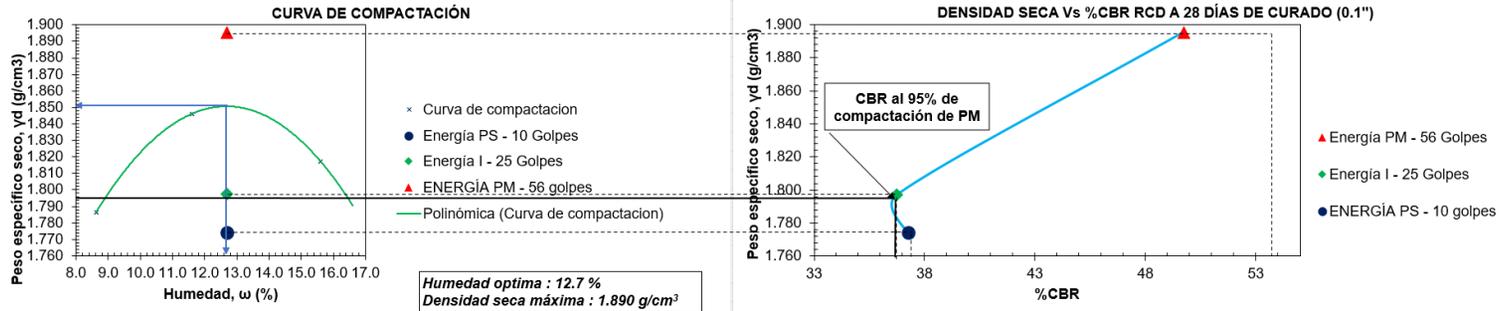
Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 27. Medición del crecimiento de CBR en el tiempo: Humedad de compactación moldes CBR de RCD como SBG-50 a 28 días de curado*

<b>No. de golpes</b>	10	25	56
<b>P1</b>	538,3	458,1	231,9
<b>P2</b>	485,1	413,3	211,9
<b>P3</b>	44,3	43,4	47,9
<b>Humedad de compactación (%)</b>	12,1	12,1	12,2

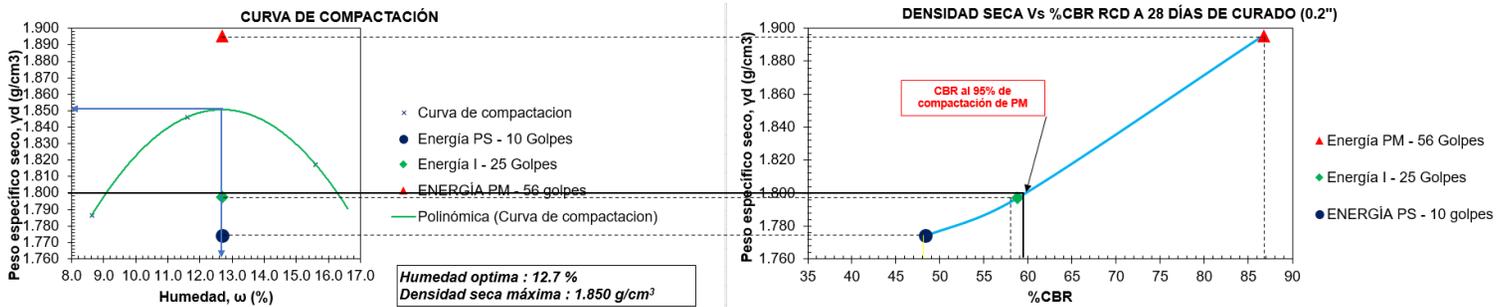
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 28. Densidad Seca vs %CBR (0,1") de AR como SBG-50 a 28 días de curado



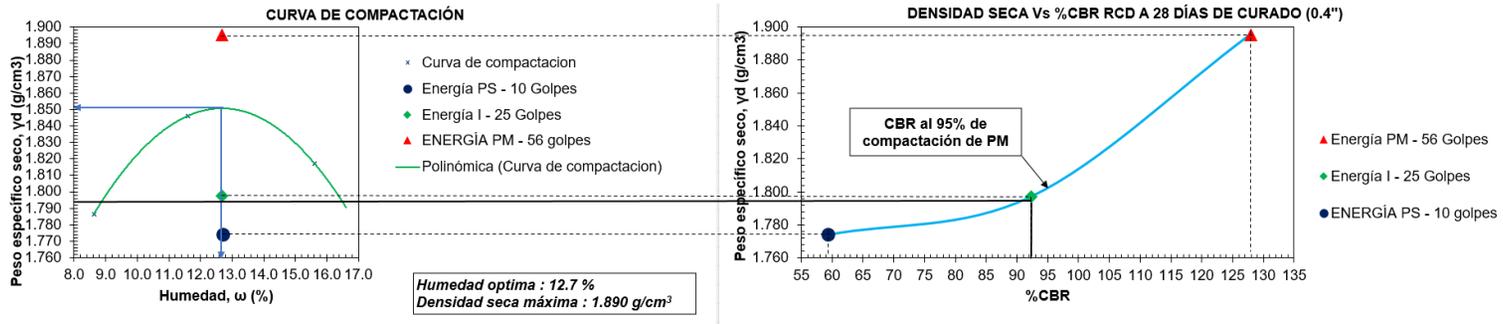
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 29. Densidad Seca vs %CBR (0,2") de AR como SBG-50 a 28 días de curado



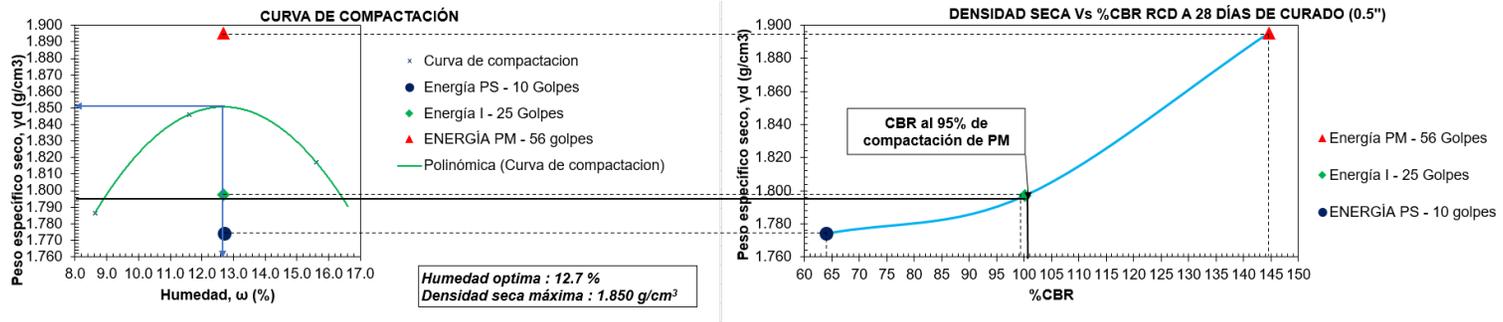
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 30. Densidad Seca vs %CBR (0,4") de AR como SBG-50 a 28 días de curado



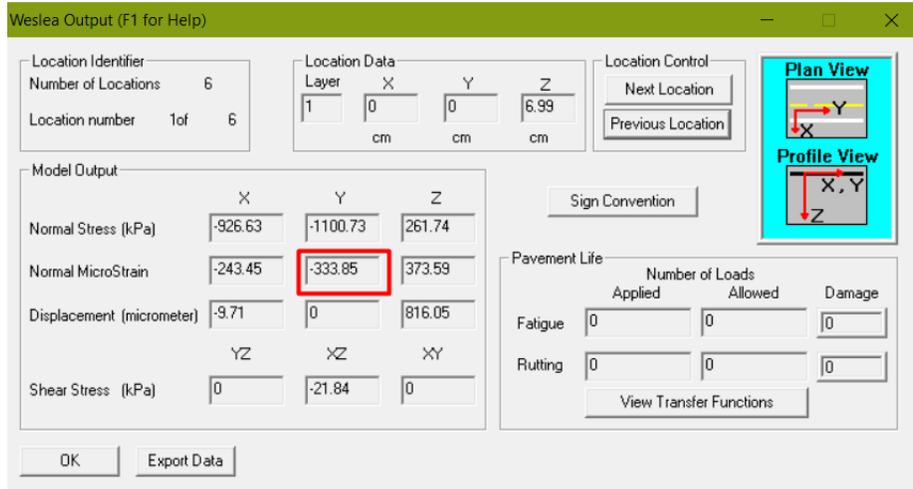
Fuente: Elaboración propia de la autora.

Anexo 31. Densidad Seca vs %CBR (0,5") de AR como SBG-50 a 28 días de curado



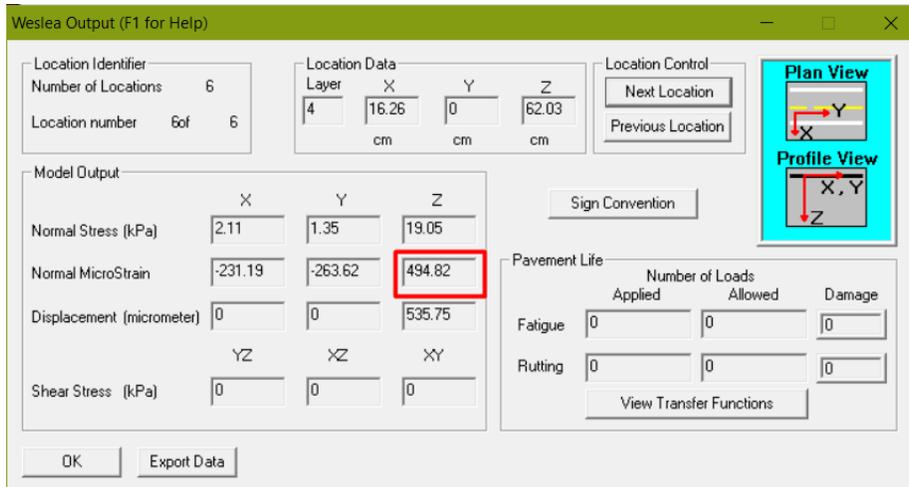
Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 32. Análisis estructural: Deformación por fatiga obtenida mediante Weslea para el pavimento 1*



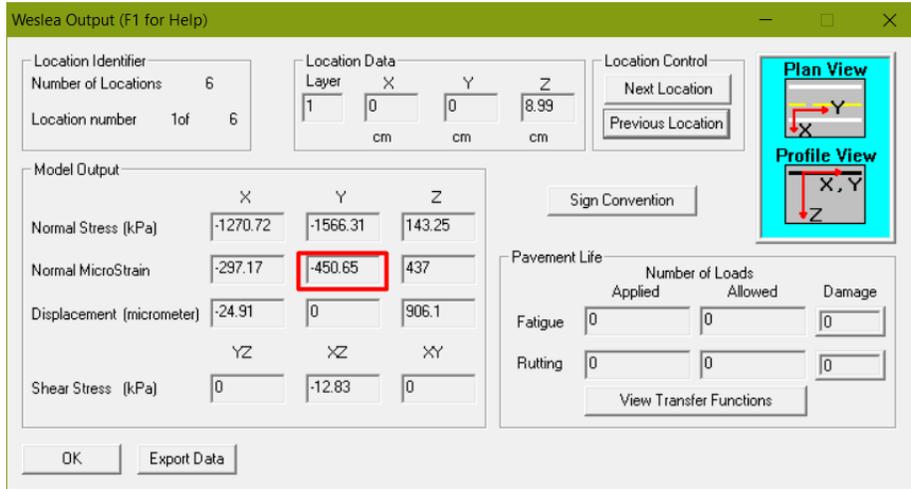
Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 33. Análisis estructural: Deformación por ahuellamiento obtenida mediante Weslea para el pavimento 1*



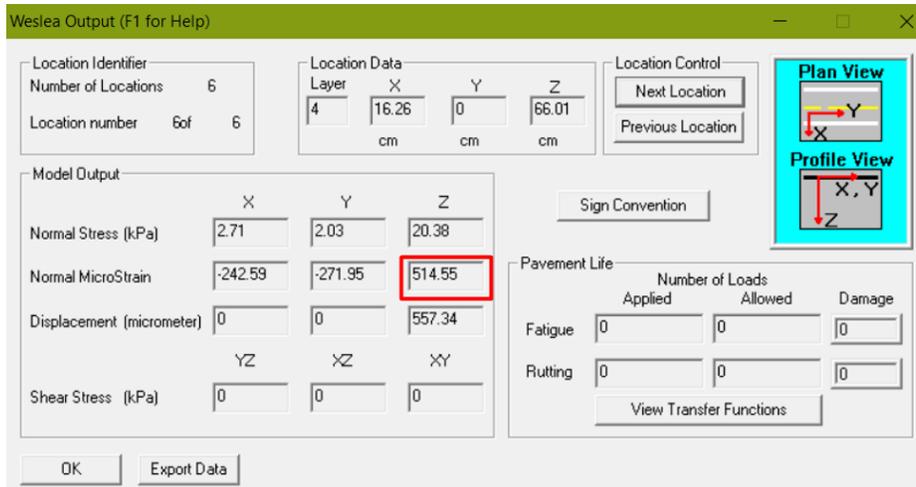
Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 34. Análisis estructural: Deformación por fatiga obtenida mediante Weslea para el pavimento 2*



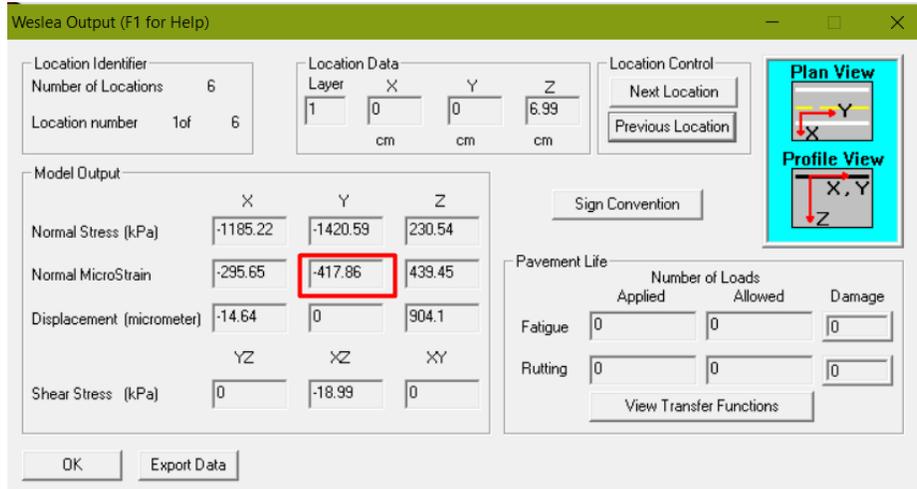
Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 35. Análisis estructural: Deformación por ahuellamiento obtenida mediante Weslea para el pavimento 2*



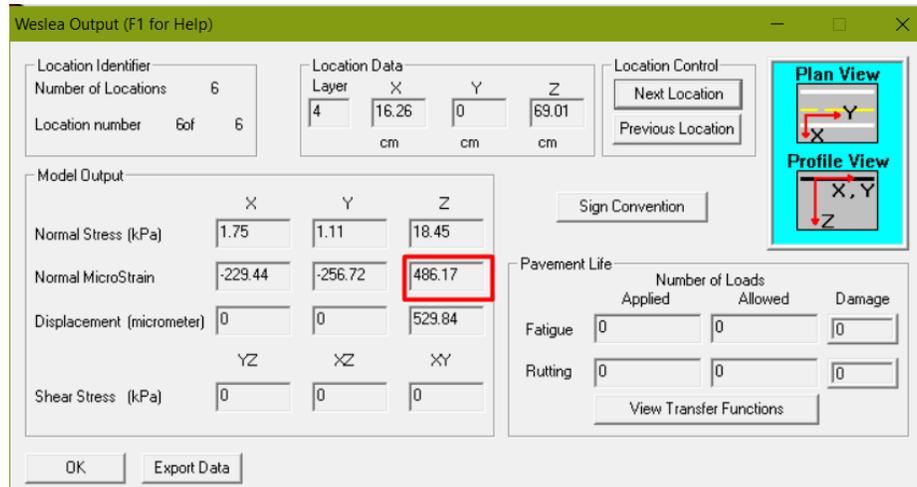
Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 36. Análisis estructural: Deformación por fatiga obtenida mediante Weslea para el pavimento 3*



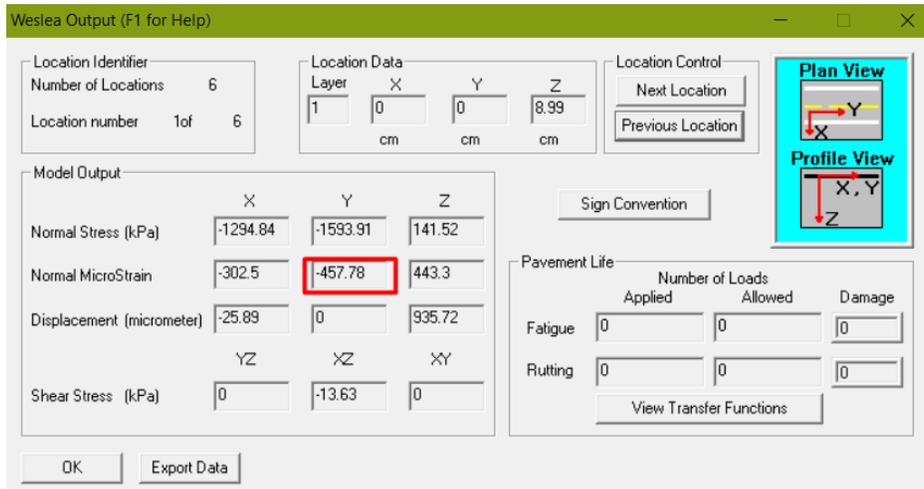
Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 37. Análisis estructural: Deformación por ahuellamiento obtenida mediante Weslea para el pavimento 3*



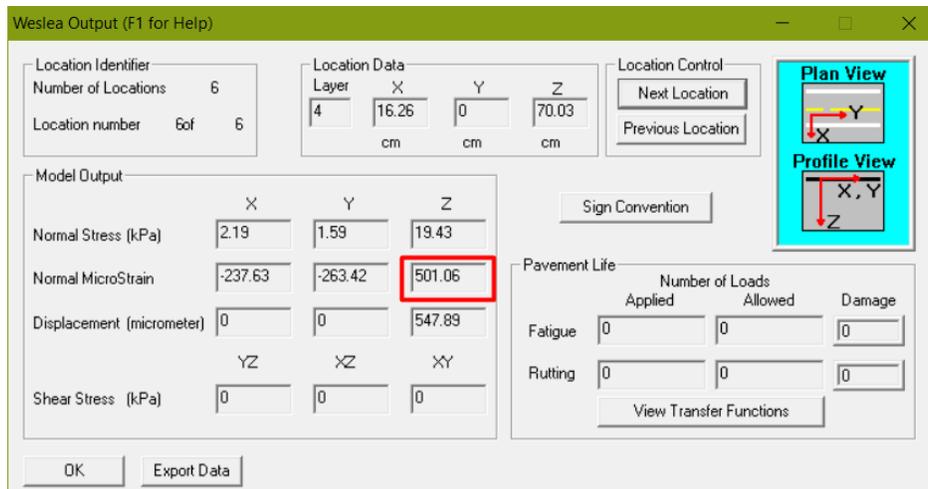
Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 38. Análisis estructural: Deformación por fatiga obtenida mediante Weslea para el pavimento 4*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 39. Análisis estructural: Deformación por ahuellamiento obtenida mediante Weslea para el pavimento 4*



Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 40. Medición de variación granulométrica: Peso de fracciones para una submuestra de 6000g para PM con gradación SBG-50*

<b>Cálculo por espécimen de 6000 gramos</b>					
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa promedio</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Nuevo % retenido</b>	<b>Cálculo por espécimen de (6000g)</b>
1/2"	12,5	60	8	12	690
3/8"	9,5	55	5	7	442
No. 4	4,75	40	15	22	1.327
No. 10	2,00	27,5	13	18	1.106
No. 40	0,425	15,5	12	18	1.062
No. 200	0,075	8,5	7	10	619
Pasa 200	-	-	9	13	752
<i>Total</i>			68	100	6.000

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 41. Prueba de medición de variación granulométrica: Peso de fracciones para una submuestra de 4500g para PM con gradación SBG-50*

<b>Cálculo por espécimen de 4500g</b>					
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa promedio</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Nuevo % retenido</b>	<b>Cálculo por espécimen de (4500g)</b>
1/2"	12,5	60	8	12	518
3/8"	9,5	55	5	7	332
No. 4	4,75	40	15	22	996
No. 10	2,00	2,5	13	18	830
No. 40	0,425	15,5	12	18	796
No. 200	0,075	8,5	7	10	465
Pasa 200	-	-	9	13	564
<i>Total</i>			68	100	4.500

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 42 . Prueba de medición de variación granulométrica: Peso de fracciones para una submuestra de 4500g para PM con gradación BG-40*

<b>Cálculo por espécimen de 4500g</b>					
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa promedio</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Nuevo % retenido</b>	<b>Cálculo por espécimen de (4500g)</b>
1/2"	12,5	64	14	18	805
3/8"	9,5	57	7	9	414
No. 4	4,75	40	17	21	958
No. 10	2,00	24	17	21	958
No. 40	0,425	14	10	13	581
No. 200	0,075	5	9	12	523
Pasa 200	-	-	5	6	261
<i>Total</i>			78	100	4.500

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 43. Prueba de medición de variación granulométrica: Peso de fracciones para una submuestra de 5200 g con gradación SBG-50 para ensayo de gravedad específica del agregado grueso*

<b>Cálculo por espécimen de 5200g (SBG-50)</b>					
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa promedio</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Nuevo % retenido</b>	<b>Cálculo por espécimen de (5200g)</b>
2"	50,0	100	0	0	0
1 1/2"	37,5	83	18	29	1.517
1"	25,0	75	8	13	650
3/4"	19,0	68	7	12	624
1/2"	12,5	60	8	13	676
3/8"	9,5	55	5	8	433
No. 4	4,75	40	15	25	1.300
<i>Total</i>			60	100	5.200

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 44. Prueba de medición de variación granulométrica: Peso de fracciones para una submuestra de 4200g con gradación BG-40 para ensayo de gravedad específica del agregado grueso*

<b>Cálculo por espécimen de 1400g (BG-40)</b>					
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa promedio</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Nuevo % retenido</b>	<b>Cálculo por espécimen de (1400g)</b>
No. 10	2,00	24	17	46	651
No. 40	0,425	14	10	28	394
No. 200	0,075	5	9	25	355
<i>Total</i>			36	100	1.400

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 45. Prueba de medición de variación granulométrica: Peso de fracciones para una submuestra de 1400g con gradación BG-40 para ensayo de gravedad específica del agregado fino*

<b>Cálculo por espécimen de 1400g (BG-40)</b>					
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa promedio</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Nuevo % retenido</b>	<b>Cálculo por espécimen de (1400g)</b>
No. 10	2,00	24	17	46	651
No. 40	0,425	14	10	28	394
No. 200	0,075	5	9	25	355
<i>Total</i>			36	100	1.400

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 46. Prueba de medición de variación granulométrica: Peso de fracciones para una submuestra de 1000g con gradación SBG-50 para ensayo de gravedad específica del agregado fino*

<b>Cálculo por espécimen de 1000g (SBG-50)</b>					
<b>No. Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa promedio</b>	<b>% Retenido</b>	<b>Nuevo % retenido</b>	<b>Cálculo por espécimen de (1000g)</b>
No. 10	2,00	28	13	40	397
No. 40	0,425	16	12	38	381
No. 200	0,075	9	7	22	222
Total			32	100	1.000

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 47. Prueba de medición de variación granulométrica: Datos de ensayo gravedades para fracción gruesa de BG-40*

<b>Ensayo No.</b>	<b>A - Masa de la muestra (SH), g</b>	<b>B - Masa de la muestra (SSS), g</b>	<b>C - Masa de la muestra saturada en agua, g</b>	<b>Temperatura agua °C</b>	<b>Densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>
1	4.170	4.463	2.626	22,5	997,66
2	4.163	4.452	2.623	22,5	997,66
3	4.146	4.449	2.621	22,5	997,66

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 48. Prueba de medición de variación granulométrica: Determinación de densidad SH, SSS y densidad aparente para fracción gruesa de BG-40*

		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Valor a reportar</b>
<b>DENSIDAD RELATIVA (Gs - SH)</b>	$SH = A/(B-C)$	2,27	2,28	2,27	2,271
<b>DENSIDAD RELATIVA (Gs - SSS)</b>	$SSS = B/(B-C)$	2,43	2,43	2,43	2,432
<b>DENSIDAD RELATIVA APARENTE (Gs - Aparente)</b>	$A/(A-C)$	2,70	2,70	2,72	2,708

<b>DENSIDAD (SH), (kg/m<sup>3</sup>)</b>	$\rho$ del agua *A/(B-C)	2.265	2.271	2.263	2.266
<b>DENSIDAD (SSS), (kg/m<sup>3</sup>)</b>	$\rho$ del agua *B/(B-C)	2.424	2.428	2.428	2.427
<b>DENSIDAD APARENTE, (kg/m<sup>3</sup>)</b>	$\rho$ del agua *A/(A-C)	2.694	2.697	2.712	2.701
<b>ABSORCIÓN, %</b>					
	B-A/A*100	7,0	6,9	7,3	7,1

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 49. Prueba de medición de variación granulométrica: Datos de ensayo gravedades para fracción gruesa de SBG-50*

<b>Ensayo No.</b>	<b>A - Masa de la muestra (SH), g</b>	<b>B - Masa de la muestra (SSS), g</b>	<b>C - Masa de la muestra saturada en agua, g</b>	<b>Temperatura a agua °C</b>	<b>Densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>
1	5.152	5.573	3.204	23,5	997,42
2	5.162	5.585	3.233	23,5	997,42

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 50. Determinación de densidad SH, SSS y densidad aparente para fracción gruesa de SBG-50*

		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Valor a reportar</b>
<b>DENSIDAD RELATIVA (Gs - SH)</b>	SH= A/(B-C)	2,17	2,19	2,185
<b>DENSIDAD RELATIVA (Gs - SSS)</b>	SSS= B/(B-C)	2,35	2,37	2,364
<b>DENSIDAD RELATIVA APARENTE (Gs - Aparente)</b>	A/(A-C)	2,64	2,68	2,660
<b>DENSIDAD (SH), (kg/m<sup>3</sup>)</b>				
	$\rho$ del agua *A/(B-C)	2.169	2.189	2.179
<b>DENSIDAD (SSS), (kg/m<sup>3</sup>)</b>				
	$\rho$ del agua *B/(B-C)	2.346	2.368	2.357

<b>DENSIDAD APARENTE, (kg/m<sup>3</sup>)</b>	$\rho$ del agua *A/(A-C)	2.638	2.669	2.654
<b>ABSORCIÓN, %</b>	B-A/A*100	8,2	8,2	8,2

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 51. Prueba de medición de variación granulométrica: Datos de ensayo gravedades para fracción fina de BG-40*

Picnómetro No	S - Masa de la muestra (SSS), g	A - Masa de la muestra (SH), g	B - Masa del picnómetro aforado lleno de agua, g	C - Masa del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g	Temperatura agua °C	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )
1	500	465,1	662,7	955,8	23,8	997,35
3	500	464,4	657,9	950,4	23,8	

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 52. Prueba de medición de variación granulométrica: Determinación de densidad SH, SSS y densidad aparente para fracción fina de BG-40*

		1	2	Valor a reportar
<b>DENSIDAD RELATIVA (Gs - SH)</b>	$SH = A/(B+S-C)$	2,248	2,238	2,243
<b>DENSIDAD RELATIVA (Gs - SSS)</b>	$SSS = S/(B+S-C)$	2,417	2,410	2,413
<b>DENSIDAD RELATIVA APARENTE (Gs - Aparente)</b>	$A/(B+A-C)$	2,704	2,702	2,703
<b>DENSIDAD (SH), (kg/m<sup>3</sup>)</b>	$997.35 * A / (B + S - C)$	2.242	2.232	2.237
<b>DENSIDAD (SSS), (kg/m<sup>3</sup>)</b>	$997.35 * S / (B + S - C)$	2.410	2.403	2.407
<b>DENSIDAD APARENTE, (kg/m<sup>3</sup>)</b>	$997.35 * A / (B + A - C)$	2.697	2.694	2.696

<b>ABSORCIÓN, %</b>	S-A/A*100	7,5	7,7	7,6
---------------------	-----------	-----	-----	-----

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 53. Datos de ensayo gravedades para fracción fina de SBG-50*

Picnómetro No.	S - Masa de la muestra (SSS), g	A - Masa de la muestra (SH), g	B - Masa del picnómetro aforado lleno de agua, g	C - Masa del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, g	Temperatura agua °C	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )
1	500	471,1	662,8	962,5	23,4	997,45
3	500	471,7	658,2	957,6	23,4	

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 54. Prueba de medición de variación granulométrica: Determinación de densidad SH, SSS y densidad aparente para fracción fina de SBG-50*

		1	2	Valor a reportar
<b>DENSIDAD RELATIVA (Gs - SH)</b>	SH= A/(B+S-C)	2,352	2,351	2,352
<b>DENSIDAD RELATIVA (Gs - SSS)</b>	SSS= S/(B+S-C)	2,496	2,493	2,494
<b>DENSIDAD RELATIVA APARENTE (Gs - Aparente)</b>	A/(B+A-C)	2,749	2,738	2,743
<b>DENSIDAD (SH), (kg/m<sup>3</sup>)</b>	997.45*A/(B+S-C)	2.346	2.345	2.346
<b>DENSIDAD (SSS), (kg/m<sup>3</sup>)</b>	997.45*S/(B+S-C)	2.490	2.486	2.488
<b>DENSIDAD APARENTE, (kg/m<sup>3</sup>)</b>	997.45*A/(B+A-C)	2.742	2.731	2.736
<b>ABSORCIÓN, %</b>	S-A/A*100	6,1	6,0	6,1

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 55. Prueba de medición de variación granulométrica: Datos y resultados ensayo modificado de compactación BG-40 con humedad óptima*

<b>Prueba No.</b>	1	2
<b>No. de golpes</b>	56	56
<b>Humedad deseada (%)</b>	13,1	13,1
<b>Humedad Inicial de la muestra (%)</b>	0,0	0,0
<b>Humedad adicional (%)</b>	13,1	13,1
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.500	4.500
<b>Peso muestra seca (g)</b>	4.500	4.500
<b>Agua adicional (cm<sup>3</sup>)</b>	590	590
<b>Molde No.</b>	15	29
<b>Peso muestra húmeda más molde (g)</b>	8.650	9.510
<b>Peso molde (g)</b>	4.140	5.060
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.510	4.450
<b>Humedad de horno (%)</b>	13,1	12,9
<b>Peso muestra seca (g)</b>	3.989	3.940
<b>Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2.123	2.123
<b>Peso específico seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,879	1,856

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 56. Prueba de medición de variación granulométrica: Cantidad de material que pasa el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200) MOLDE 15 \_ BG-40*

B (g)	3.980
C (g)	3.575
<b>A (%)</b>	<b>10,2</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 57. Prueba de medición de variación granulométrica: Cantidad de material que pasa el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200) MOLDE 29 \_ BG-40*

B (g)	3.940
C (g)	3.495
<b>A (%)</b>	<b>11,3</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 58. Prueba de medición de variación granulométrica: Datos y resultados ensayo modificado de compactación para SBG-50 con humedad óptima*

<b>Prueba No.</b>	1	2
<b>No. de golpes</b>	56	56
<b>Humedad deseada (%)</b>	12,7	12,7
<b>Humedad Inicial de la muestra (%)</b>	0,0	0,0
<b>Humedad adicional (%)</b>	12,7	12,7
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.500	4.500
<b>Peso muestra seca (g)</b>	4.500	4.500
<b>Agua adicional (cm<sup>3</sup>)</b>	572	572
<b>Molde No.</b>	38	39
<b>Peso muestra húmeda más molde (g)</b>	8.920	9.140
<b>Peso molde (g)</b>	4.605	4.750
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.315	4.390
<b>Humedad de horno (%)</b>	12,7	12,7
<b>Peso muestra seca (g)</b>	3.829	3.895
<b>Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2.123	2.123
<b>Peso específico seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,803	1,835

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 59. Prueba de medición de variación granulométrica: Cantidad de material que pasa el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200) MOLDE 38 \_ SBG-50*

B (g)	3.810
C (g)	3.200
<b>A (%)</b>	<b>16,0</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 60. Prueba de medición de variación granulométrica: Cantidad de material que pasa el tamiz de 75  $\mu$ m (No. 200) MOLDE 39 \_ SBG-50*

B (g)	3.890
C (g)	3.225
<b>A (%)</b>	<b>17,1</b>

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 61. Prueba de medición de variación granulométrica: Ensayo modificado de compactación de AR como BG-40*

<b>Prueba No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>No. de golpes</b>	56	56	56	56
<b>Humedad deseada (%)</b>	10,0	12,5	13,0	15,3
<b>Humedad Inicial de la muestra (%)</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Humedad adicional (%)</b>	10,0	12,5	13,0	15,3
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.500	4.500	4.500	4.500
<b>Peso muestra seca (g)</b>	4.500	4.500	4.500	4.500
<b>Agua adicional (cm<sup>3</sup>)</b>	450	563	585	689
<b>Molde No.</b>	34	39	34	22
<b>Peso muestra húmeda más molde (g)</b>	9.325	9.305	9.670	9.570
<b>Peso molde (g)</b>	5.020	4.750	5.095	5.075
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.305	4.555	4.575	4.495
<b>Humedad de horno (%)</b>	11,0	12,4	13,9	15,0
<b>Peso muestra seca (g)</b>	3.879	4.054	4.015	3.908
<b>Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2.123	2.123	2.123	2.123
<b>Peso específico seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,827	1,910	1,891	1,841

Fuente: Elaboración propia de la autora.

*Anexo 62. Prueba de medición de variación granulométrica: Ensayo modificado de compactación de AR como SBG-50*

<b>Prueba No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>No. de golpes</b>	56	56	56
<b>Humedad deseada (%)</b>	10,0	13,0	16,0
<b>Humedad Inicial de la muestra (%)</b>	0,0	0,0	0,0
<b>Humedad adicional (%)</b>	10,0	13,0	16,0
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	6.000	4.500	4.500
<b>Peso muestra seca (g)</b>	6.000	4.500	4.500
<b>Agua adicional (cm<sup>3</sup>)</b>	600	585	720
<b>Molde No.</b>	23	35	24
<b>Peso muestra húmeda más molde (g)</b>	9.140	9.020	9.460
<b>Peso molde (g)</b>	5.020	4.645	5.000
<b>Peso muestra húmeda (g)</b>	4.120	4.375	4.460
<b>Humedad de horno (%)</b>	8,6	11,6	15,6
<b>Peso muestra seca (g)</b>	3.793	3.920	3.858
<b>Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2.123	2.123	2.123
<b>Peso específico seco (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,786	1,846	1,817

Fuente: Elaboración propia de la autora.