

**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**



FABIÁN ANDRÉS GARCÍA PABÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
POPAYÁN-CAUCA
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**



Por:
Ing. FABIÁN ANDRÉS GARCÍA PABÓN

PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
MODALIDAD PROFUNDIZACIÓN

Director:
FERNEY QUIÑONES SINISTERRA
Ingeniero civil, MSc, PhD

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
POPAYÁN-CAUCA
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**

FABIÁN ANDRÉS GARCÍA PABÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD DEL CAUCA

Tesis de maestría expuesta al Comité de Programa Maestría en Ingeniería de Pavimentos de la Universidad del Cauca para obtener el título de Magíster.

Aprobado por:

Ferney Quiñones Sinisterra
(DIRECTOR)

Manuel Alejandro Rojas Manzano
(JURADO EXTERNO)

Luis Fernando Garcés Muñoz
(JURADO INTERNO)

Popayán, abril de 2023

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

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. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Cauca, Colombia, 104 p.

ASIGNACIÓN DE DERECHOS

NOMBRE DEL AUTOR: Fabián Andrés García Pabón

TÍTULO DE LA TESIS DE MAESTRÍA: 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

TÍTULO/AÑO: Magíster/2023

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

Fabián Andrés García Pabón
CC.: 1107054864
e-mail: andresgarciap89@gmail.com

Dedicatoria

Dedico esta investigación al Señor, pues estoy seguro de que sin la bendición, sabiduría y amor de Dios hubiera sido un reto mucho más grande poder culminarla satisfactoriamente. A lo largo del proceso fue necesario aferrarme a la fe y esperanza de la perfecta voluntad de mi Padre para enfrentar los obstáculos que se me presentaron.

Agradecimientos

En primer lugar, mis agradecimientos van dirigidos a mi estimado director Ferney Quiñones, quien, con su perseverancia y valioso conocimiento, convirtió este proceso de aprendizaje en una experiencia inolvidable que he plasmado en cada palabra.

En segunda instancia, se encuentra mi amada y maravillosa familia, la cual merece toda la mención y agradecimiento del presente proyecto, pues es gracias a ella, a su apoyo económico y emocional demostrado incondicionalmente, que hoy este sueño se convierte en realidad. No cabe duda que en las instituciones educativas adquirí gran parte de mi conocimiento y educación integral; sin embargo, los pilares que definen la solidez de quién soy, más allá del ámbito académico y profesional, fueron construidos entre las paredes de mi hogar.

Por último, y no menos importante, agradezco a todos los miembros del equipo docente de la Universidad del Cauca, quienes compartieron a diario y de forma generosa sus conocimientos para hacer de cada estudiante personas íntegras, que se destacan por su excelencia como profesionales y seres humanos. Gracias por su tiempo, consejos, dedicación y por su notoria pasión por la actividad docente. El presente trabajo es el fruto y reflejo que recopila sus valiosos aportes.

Resumen

El sector de la construcción está experimentando un rápido crecimiento, lo que ha llevado a un aumento en la cantidad de edificaciones, demoliciones y actividades de infraestructura. Como consecuencia, se generan grandes cantidades de residuos de construcción y demolición (RCD). Estos residuos plantean desafíos económicos, sociales y ambientales, especialmente cuando su disposición final no se controla adecuadamente, lo que dificulta su reutilización. En este contexto, es crucial encontrar formas de mitigar el impacto de los RCD y promover alternativas sostenibles que beneficien tanto al medio ambiente como a la economía.

La pavimentación se presenta como un campo propicio para desarrollar soluciones sostenibles y aprovechar los RCD como materiales de construcción. Por lo tanto, en esta investigación se analizan los conceptos más relevantes relacionados con este tema; donde el objetivo principal es Evaluar RCD provenientes de la ciudad de Cali que posteriormente se transforman en agregados reciclados de concreto (ARC) para su utilización como agregados en capas de base y subbase de pavimento. Para ello, se utilizó material de la ciudad en mención, ya que cuenta con una considerable cantidad de RCD. Se extrajeron muestras de la escombrera de la 50, donde la mayoría de los residuos son depositados. La composición principal de estas muestras es un hormigón con características especiales, que posteriormente fueron trituradas en la planta de aprovechamiento de la empresa Rocales y Concretos, ubicada en la misma ciudad, para transformarlas en agregados reciclados de concreto (ARC). Además, se recolectó un agregado natural adicional de la planta del Aguacatal, también en Cali, para cumplir con los requisitos de resistencia, seguridad y calidad necesarios en las construcciones.

Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para evaluar los materiales, incluyendo ensayos de granulometría, equivalente de arena, ensayo de abrasión en la Máquina de los Ángeles, angularidad de la fracción fina, gravedad específica, límites de Atterberg, índice de aplanamiento y alargamiento, ensayo de 10% de finos, ensayo de caras fracturadas, ensayo Micro-Deval, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, porcentaje de absorción, ensayo de azul de metileno, prueba de California Bearing Ratio (CBR) y módulo resiliente (MR). Los resultados obtenidos se compararon con las especificaciones técnicas para bases y subbases granulares establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y por

el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). Este análisis permitió identificar mejoras significativas en algunas características al utilizar la combinación de ambos materiales.

Posteriormente, se realizó un análisis de dosificación tanto para subbase granular, como para base granular, donde se obtuvieron proporciones de 80% ARC y 20% de agregado de aporte para la creación de la subbase; para la base, los porcentajes obtenidos fueron 35% ARC y 65% de agregado de aporte y se sometió el conjunto nuevamente a ensayos, observando mejoras considerables en las propiedades del material, en este punto, se realizaron pruebas de CBR, módulo resiliente y ensayo a la compresión, a diferentes períodos de curado (1, 7, 14 y 28 días), con el fin de evaluar las propiedades resilientes y el efecto del cemento remanente en contacto con agua. Los resultados demostraron un comportamiento positivo del material ARC en conjunto con el material de aporte, lo que respalda su utilización como base y subbase granular en pavimentos.

Es así que, esta investigación destaca la importancia de abordar el problema de los RCD en el sector de la construcción y muestra cómo la pavimentación puede ser un ámbito adecuado para implementar soluciones sostenibles utilizando estos materiales. Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad del uso de ARC como base y subbase granular, contribuyendo así a la mitigación de impactos ambientales y al desarrollo de una economía más circular en el sector de la construcción.

Abstract

The construction sector is experiencing rapid growth, which has led to an increase in the number of builds, demolitions, and infrastructure activities. As a consequence, large amounts of construction and demolition waste (RCD) are generated. This waste poses economic, social and environmental challenges, especially when its final disposal is not adequately controlled, making it difficult to reuse. In this context, it is crucial to find ways to mitigate the impact of RCDs and promote sustainable alternatives that benefit both the environment and the economy.

Paving is presented as a propitious field to develop sustainable solutions and take advantage of RCD as construction materials. Therefore, this research analyzes the most relevant concepts related to this topic; where the main objective is to evaluate RCD from the city of Cali that are subsequently transformed into recycled concrete aggregates (ARC) for use as aggregates in base and subbase layers of pavement. For this, material from the city in question was used, since it has a considerable amount of RCD. Samples were extracted from the 50th dump, where most of the waste is deposited. The main composition of these samples is a concrete with special characteristics, which was later crushed in the use plant of the Rocales y Concretos company, located in the same city, to transform it into ARC. In addition, an additional granulometric material was collected from the Aguacatal plant, also in Cali, to meet the necessary resistance, safety and quality requirements in construction.

Laboratory tests were carried out to evaluate the materials, including granulometry tests, sand equivalent, abrasion test in the Los Angeles Machine, fine fraction angularity, specific gravity, Atterberg limits, flattening and elongation index, 10% fines test, fractured faces test, Micro-Deval test, clay lump and friables content, percent absorption, methylene blue test, California Bearing Ratio (CBR) test, and modulus of resilient (MR). The results obtained were compared with the technical specifications for granular bases and sub-bases established by the National Highway Institute (INVIAS) and the Urban Development Institute (IDU). This analysis allowed to identify significant improvements in some characteristics when using the combination of both materials.

Subsequently, a dosage analysis was carried out for both the granular subbase and the granular base and the set was again subjected to tests, observing considerable improvements in the properties of the material, at this point, CBR tests, resilient modulus and a test were carried out. compression, at different curing periods (1, 7, 14 and 28 days), in order to evaluate the resilient properties and the effect of the remaining cement in contact with water. The results demonstrated a positive behavior of the ARC material together with the filler material, which supports its use as a granular base and subbase in pavements.

In summary, this research highlights the importance of addressing the problem of RCD in the construction sector and shows how paving can be a suitable field to implement sustainable solutions using these materials. The results obtained support the feasibility of using ARC as a granular base and subbase, thus contributing to the mitigation of environmental impacts and the development of a more circular economy in the construction sector.

Contenido

1-	Introducción	17
2-	Planteamiento del problema.....	18
3-	Justificación	20
4-	Objetivos.....	22
4.1-	Objetivo general	22
4.2-	Objetivos específicos.....	22
5-	Marco teórico	23
5.1-	Residuos de construcción y demolición	23
5.2-	Agregados reciclados	24
5.3-	Impacto ambiental	25
5.4-	Normatividad	26
5.5-	Residuos de construcción y demolición usados en pavimentos.....	29
5.6	CBR.....	32
5.7	Módulo resiliente	32
6-	Metodología	34
Figura 1-	Etapas de la investigación	34
6.1-	Revisión bibliográfica.....	35
6.2-	Selección de materiales	35
6.3-	Caracterización de los materiales.....	35
6.3.1-	Residuos de construcción y demolición	35
6.3.2-	Material de aporte	39
6.4-	Ensayos para el material ARC y el agregado de aporte	41
6.4.1-	Granulometría	41
6.4.2-	Equivalente de arena	43
6.4.3-	Desgaste en Máquina de los Ángeles	44
6.4.4-	Angularidad de la fracción fina	46
6.4.5-	Gravedad específica	47
6.4.6-	Límites de Atterberg.....	49
6.4.7-	Índice de aplanamiento y alargamiento	50
6.4.8-	Ensayo de 10% de finos	51
6.4.9-	Ensayo de caras fracturadas.....	52
6.4.10-	Ensayo Micro-Deval	53
6.4.11-	Contenido de arcilla y partículas deleznable	53
6.4.12-	Azul de metileno	53
6.4.13-	Ensayo de CBR	55
6.4.14-	Módulo resiliente.....	55
6.5-	Cálculo de dosificación para combinación de ARC y material de aporte para base y sub-base granular	56
6.6.1-	Módulo resiliente.....	56
6.6.2	CBR a los 1, 7, 14 y 28 días.....	56
6.6.3-	Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días	57
6.7-	Análisis de resultados.....	58

7- Resultados y análisis de resultados	59
7.1- Granulometría ARC	59
7.2- Granulometría del material de aporte	62
7.3- Equivalente de arena ARC	64
7.4- Equivalente de arena material de aporte	65
7.5- Desgaste en Máquina de los Ángeles ARC	65
7.6- Desgaste en Máquina de los Ángeles material de aporte	66
7.7- Angularidad de la fracción fina ARC	66
7.8- Angularidad de la fracción fina material de aporte	66
7.9- Gravedad específica ARC	67
7.10- Gravedad específica material de aporte	68
7.11- Límites de Atterberg ARC.....	68
7.12- Límites de Atterberg material de aporte.....	69
7.13- Índice de aplanamiento y alargamiento ARC.....	70
7.14- Índice de aplanamiento y alargamiento material de aporte.....	70
7.15- Ensayo de 10% de finos ARC	72
7.16- Ensayo de 10% de finos material de aporte	72
7.17- Ensayo de caras fracturadas ARC.....	72
7.18- Ensayo de caras fracturadas material de aporte.....	72
7.19- Ensayo Micro-Deval ARC.....	73
7.20- Ensayo Micro-Deval material de aporte.....	73
7.21- Contenido de arcilla y partículas deleznable ARC	74
7.22- Contenido de arcilla y partículas deleznable material de aporte.....	74
7.23- Azul de Metileno ARC	74
7.24- Azul de metileno material de aporte	74
7.25- CBR ARC	74
7.26- CBR Material de aporte	75
7.27- Módulo resiliente ARC.....	76
7.28- Módulo resiliente material de aporte.....	76
7.29-Cálculo de dosificación de ARC y material de aporte para base y subbase granular.....	77
7.30- CBR de combinación de ARC con material de aporte como base, a los 1, 7, 14 y 28 días de curado	77
7.31- CBR de combinación de ARC con material de aporte como sub-base, a los 1, 7, 14 y 28 días de curado.....	79
7.32- Módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como base.....	80
7.33- Módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como sub-base	81
7.34- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como base.....	82
7.35- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como sub-base	83
8- Conclusiones	87
9- Recomendaciones para trabajos futuros	89
Bibliografía.....	90
Anexos.....	94

Anexo 1- Especificaciones INVIAS para agregados sub-base granular	94
Anexo 2- Especificaciones INVIAS para agregados base granular	94
Anexo 3- Datos de la muestra de ARC para ensayo de granulometría	95
Anexo 4- Datos del material de aporte para ensayo de granulometría	95
Anexo 5- Resultados límite líquido	95
Anexo 6- Determinación de límite líquido gráficamente	96
Anexo 7- Datos de curva de compactación por proctor modificado para ARC	96
Anexo 8- Curva de compactación por proctor modificado para ARC	97
Anexo 9- Datos para CBR de ARC	97
Anexo 10- Gráfica CBR para ARC	98
Anexo 11- Datos de curva de compactación por proctor modificado para material de aporte	98
Anexo 12- Curva de compactación por proctor modificado para material de aporte	99
Fuente: elaboración propia.	99
Anexo 13- Tabla con datos para CBR de ARC	99
Anexo 14- Gráfica CBR para material de aporte	100
Anexo 15- Datos para CBR de ARC con material de aporte como base	100
Anexo 16- Gráfica CBR de ARC con material de aporte como base	101
Anexo 17- Tabla con datos para CBR de ARC con material de aporte como sub-base	101
Anexo 18- Gráfica CBR de ARC con material de aporte como sub-base	102
Anexo 19- Tabla de datos para ensayo de módulo resiliente de ARC	102
Anexo 20- Tabla de datos para ensayo de módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como base	103
Anexo 21- Tabla de datos para ensayo de módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como sub-base	103
Anexo 22- Normas de referencia de los ensayos	104

Índice de ilustraciones

Ilustración 1- Residuos de construcción y demolición de Cali	36
Ilustración 2- Trituradora de la Empresa Rocales y Concretos S.A.S.....	37
Ilustración 3- Material ARC	38
Ilustración 4- Agregado natural utilizado en el proyecto	40
Ilustración 5- Tamizado del material (granulometría).....	42
Ilustración 6- Pasante Tamiz 200 de ARC por lavado	42
Ilustración 7- Granulometría del material de aporte.....	43
Ilustración 8- Probetas del ensayo de equivalente de arena para ARC.....	44
Ilustración 9- Ensayo de equivalente de arena para agregado de aporte.....	44
Ilustración 10- Desgaste del ARC en la Máquina de los Ángeles	45
Ilustración 11- Desgaste del material de aporte en la Máquina de los Ángeles	46
Ilustración 12- Ensayo de angularidad de la fracción fina para el ARC	46
Ilustración 13- Ensayo de angularidad de la fracción fina del material de aporte.....	47
Ilustración 14- Ensayo de gravedad específica para la fracción fina de ARC	47
Ilustración 15- Ensayo de gravedad específica para la fracción gruesa de ARC	48
Ilustración 16- Ensayo de gravedad específica del agregado de aporte.....	48
Ilustración 17- Ensayo de límites de Atterberg para ARC.....	49
Ilustración 18- Ensayo de límites de Atterberg para material de aporte.....	50
Ilustración 19- Índice de aplanamiento y alargamiento de partículas de ARC	50
Ilustración 20- Índice de aplanamiento y alargamiento de material de aporte	51
Ilustración 21- Ensayo de 10% de finos para material ARC	51
Ilustración 22- Ensayo de 10% de finos para material de aporte.....	52
Ilustración 23- Caras fracturadas de ARC	52
Ilustración 24- Ensayo de azul de metileno para ARC.....	54
Ilustración 25- Ensayo de azul de metileno para agregado de aporte	54
Ilustración 26- Ensayo de CBR	55
Ilustración 27- Ensayo de resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días.....	58

Índice de gráficas

Gráfica 1- Semi-logarítmica de granulometría ARC	38
Gráfica 2- Porcentajes de materiales	39
Gráfica 3- Semi-logarítmica de granulometría	40
Gráfica 4- Análisis granulometría con la de una base granular BG-40	60
Gráfica 5- Análisis granulometría con la de una sub-base granular SBG-50	61
Gráfica 6- Análisis granulometría con la de una base granular BG-40	63
Gráfica 7- Análisis granulometría con la de una sub-base granular SBG-50	64
Gráfica 8- Carta de Casa Grande.....	69
Gráfica 9- CBR ARC	75
Gráfica 10- CBR material de aporte	75
Gráfica 11- Módulo resiliente de ARC	76
Gráfica 12- CBR para BG vs días de curado.....	78
Gráfica 13- CBR para SBG vs días de curado.	80
Gráfica 14- Módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como base	80
Gráfica 15- Módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como sub-base	81
Gráfica 16- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de curado para combinación de ARC con material de aporte como base.....	83
Gráfica 17- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como sub-base	84

Índice de tablas

Tabla 1- Granulometría del material ARC	59
Tabla 2- Granulometría del material de aporte	62
Tabla 3- Equivalente de arena	64
Tabla 4- Equivalente de arena	65
Tabla 5- Porcentaje de pérdidas en Máquina de los Ángeles	65
Tabla 6- Porcentaje de pérdidas en Máquina de los Ángeles	66
Tabla 7- Angularidad fracción fina ARC	66
Tabla 8- Angularidad fracción fina ARC	67
Tabla 9- Gravedad específica de fracción gruesa	67
Tabla 10- Gravedad específica de fracción fina	67
Tabla 11- Gravedad específica de fracción gruesa	68
Tabla 12- Gravedad específica de fracción fina	68
Tabla 13- Límites de Atterberg ARC	68
Tabla 14- Índice de aplanamiento	70
Tabla 15- Índice de alargamiento	70
Tabla 16- Índice de aplanamiento	71
Tabla 17- Índice de alargamiento	71
Tabla 18- 10% de finos	72
Tabla 19- 10% de finos	72
Tabla 20- Micro-Deval	73
Tabla 21- Micro-Deval	73
Tabla 22- Azul de metileno	74
Tabla 23- Azul de metileno	74
Tabla 24- Resultados de CBR de combinación de ARC con material de aporte como base	77
Tabla 25- Resultados de CBR de combinación de ARC con material de aporte como subbase	79
Tabla 26- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como base	82
Tabla 27- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como sub-base	83
Tabla 28- Resultados de ensayos	85
Tabla 29- Resultados de ensayos	86

1- Introducción

En la actualidad, en Colombia se ha observado un notable incremento en la generación de residuos de construcción y demolición. De acuerdo con la resolución 472 del 2017 del Ministerio de Medio Ambiente, se estima que se producen hasta 22 millones de toneladas de RCD. En el caso específico de Cali, un estudio realizado por CVC-Univalle reveló que se generaron 1.1 millones de toneladas de RCD en el periodo 2020-2021. Estos datos demuestran el creciente impacto ambiental y sanitario de dichos residuos, los cuales pueden resultar en la contaminación del aire, agua y suelo, así como también afectar la calidad visual y la salud pública. Por ende, es crucial tomar medidas para mitigar estos efectos durante la ejecución de los proyectos.

En este contexto, se propone una alternativa innovadora para la construcción de bases y sub-bases de pavimentos, la cual consiste en utilizar agregados reciclados (AR) como material de relleno. Dado que la construcción de carreteras desempeña un papel fundamental en el desarrollo de ciudades y países, al facilitar la conexión entre comunidades, el acceso a servicios y el transporte de mercancías, el empleo de AR en esta aplicación ofrece ventajas económicas, ambientales y sociales. Esto amplía las posibilidades de construir carreteras de manera sostenible.

Con el fin de evaluar la viabilidad de esta alternativa, se realizaron ensayos de laboratorio para analizar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales. Durante estos ensayos, se comparó el rendimiento de los materiales granulares convencionales con el de los AR, y se exploraron diversas combinaciones para mejorar ciertos requisitos de calidad.

2- Planteamiento del problema

La gestión inadecuada de los RCD representa una importante fuente de contaminación ambiental y un riesgo para la salud pública, además de ocasionar pérdidas económicas y reducir la productividad en obras de construcción. En 2018, se crearon 820 millones de toneladas de RCD en la Unión Europea, lo que representa el 46% del total de la basura producida (González, 2021). En el caso de Estados Unidos, reportes dados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) este país alcanza los 600 millones de toneladas de residuos al año. Por su parte, Colombia, ha llegado a producir hasta 22 millones de RCD según reportes del Ministerio de Medio Ambiente en su resolución 0472 de 2017.

Se destaca que muchas ciudades han prohibido la explotación de los recursos naturales de arenisca, lo que dificulta obtener materiales de construcción y un aumento de precios debido a la mayor demanda y menor oferta en el mercado (Liu et al., 2023); además, la demanda de recursos naturales agotables es un desafío para la industria de pavimentos, pues la extracción de éstos es una práctica insostenible (Ji y Wang, 2023). Por lo tanto, es primordial abordar el problema de manera integral mediante la implementación de prácticas de gestión de residuos, con el fin de reducir su impacto en el entorno social y el medio ambiente. Una alternativa es transformar los RCD en agregados reciclados AR; este proceso se hace por medio de una clasificación, transporte y trituración, para que al tener este material pueda ser utilizado en la construcción de pavimentos, lo que permitiría darles un segundo uso y mitigar los daños ambientales, a la vez que reducir los costos de construcción y ofrecer una alternativa a la manera convencional de realizar este tipo de estructuras.

Sin embargo, se deben evaluar y analizar las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los RCD utilizados en la construcción de pavimentos, comparándolas con las de los agregados convencionales calificados como de buena calidad para determinar si estos pueden llegar a presentar semejanzas en sus características y teniendo en cuenta sus diferencias. Aunque existen pautas y análisis en la literatura sobre el uso de RCD en la construcción de pavimentos, uno de los principales desafíos es la falta de estudios y regulaciones claras en este ámbito. Por lo tanto, es necesario tratar el problema y promover el desarrollo de normativas específicas para el uso de RCD en la construcción de pavimentos.

Cabe destacar que en América Latina la gestión de residuos aún es incipiente y el reciclaje de RCD es especialmente limitado. Por lo tanto, la presente investigación busca contribuir a la generación de propuestas que respondan a esta situación y reduzcan la explotación de recursos naturales no renovables. De tal manera que, la pregunta problema que rige la investigación es: ¿cuáles son las propiedades mecánicas, físicas y químicas AR de la ciudad de Cali para su utilización como agregados en capas de base y sub-base de pavimento?

3- Justificación

La planificación de la infraestructura en cualquier municipio es esencial para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, lo que se logra a través de la prestación de servicios públicos básicos, como el agua, el saneamiento, la infraestructura del transporte, y la generación de empleo. La construcción de una carretera es importante a la hora de buscar desarrollo económico; por ello, permitir una circulación de vehículos de manera continua y segura es uno de los factores clave a tener en cuenta en la Ingeniería Civil. Aunque existen desafíos asociados a los materiales de construcción convencionales, especialmente debido a factores ambientales que se han presentado actualmente, se han realizado diversas investigaciones para abordar estos problemas y lograr construcciones adecuadas.

En la actualidad, debido a la evolución de la construcción y las demoliciones necesarias se producen toneladas de residuos, por lo cual la disposición final de material excedente significa una alta contaminación ambiental. Al respecto, sobresale que la infraestructura del transporte es una de las que más requiere materiales naturales. Por lo tanto, es importante desarrollar un método de reutilización de residuos sólidos, siendo necesario hacer uso de los RCD (Hinostroza, 2020). Cabe destacar que el empleo de materiales reciclados para generar una construcción más sostenible se ha convertido en una fuente atractiva y de alto impacto ambiental en la construcción de pavimentos (Robinson et al., 2004). Con este propósito, surgen nuevas teorías para el uso de los RCD como sustitutos parciales de agregados, capas de rodadura o estratos inferiores de la carpeta asfáltica (Zhang et al., 2021). De acuerdo a las propiedades, pueden incluso reducirse los costos, téngase en cuenta la investigación de Méndez (2015), donde trabajó con un material tal, que permitió trabajar con espesores de capa menores a los requeridos mediante el empleo de agregados convencionales, además, en el país, se han incluido normativas destinadas a contribuir con la disminución de contaminación ambiental que generan los RCD, como lo es la resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, en la cual se exige una gestión integral de estos materiales en proyectos constructivos.

Por otro lado, se debe resaltar que la Universidad del Cauca cuenta con el personal y equipos idóneos para la realización de los ensayos necesarios en esta investigación, motivo por el cual la presente propuesta busca dar respuesta al interrogante sobre si los RCD provenientes de la escombrera de la 50

de Cali, que posteriormente se convierten en ARC se pueden emplear como agregado en capas de base y sub-base de pavimentos. Todo lo anterior permite evidenciar la relevancia que tiene el estudio para evaluar el comportamiento de ciertas combinaciones entre AR y agregados de aporte para conocer su viabilidad técnica, económica y ambiental en el futuro.

4- Objetivos

4.1- Objetivo general

- Evaluar Residuos de construcción y demolición (RCD) de la ciudad de Cali para su utilización como agregados en capas de base y subbase de pavimento.

4.2- Objetivos específicos

- Caracterizar los residuos RCD de acuerdo a las especificaciones técnicas vigentes en Colombia, para bases y sub-bases de pavimentos.
- Caracterizar el agregado de aporte de acuerdo a las especificaciones técnicas vigentes en Colombia, para bases y sub-bases de pavimentos.
- Determinar los materiales con mejor comportamiento en cuanto a resistencia, compactación y condiciones de resiliencia.

5- Marco teórico

Los RCD son residuos que surgen de actividades constructivas y de demolición, por ello, es crucial mitigar su impacto ambiental y promover alternativas que resulten beneficiosas tanto para el medio ambiente como para la economía. La pavimentación se presenta como un campo propicio para desarrollar estas alternativas sostenibles y aprovechar los RCD como materiales de construcción, es por eso que a continuación, se examinarán los conceptos más relevantes en relación con este tema.

5.1- Residuos de construcción y demolición

Según la resolución 0472 de 2017 expedida por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de Colombia, los RCD son los residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de obras conexas, se debe tener en cuenta que es crucial mitigar sus impactos ambientales y promover alternativas que resulten beneficiosas tanto para el medio ambiente como para la economía. La pavimentación se presenta como un campo propicio para desarrollar estas alternativas sostenibles y aprovechar los RCD como materiales de construcción.

Al considerar la utilización de materiales provenientes de RCD en la construcción de estructuras viales, es esencial tener un conocimiento claro de sus componentes, ya que algunos de ellos podrían limitar su aplicabilidad en este ámbito. Los RCD, típicamente incluyen concreto, ladrillo, acero, madera, plástico e incluso materiales peligrosos. Por lo tanto, resulta fundamental distinguir aquellos materiales que sean funcionales y capaces de rendir adecuadamente, a fin de aprovechar su uso de manera efectiva.

En ese sentido, la resolución previamente mencionada proporciona una clasificación de los residuos según su composición.

En la resolución, se pueden encontrar dos grupos de residuos: los RCD susceptibles de aprovechamiento y los RCD no susceptibles de aprovechamiento. El primer grupo incluye los productos de excavación y sobrantes de la adecuación de terreno, que son coberturas vegetales, tierras, limos y materiales pétreos productos de la excavación, entre otros. También se incluyen los productos de cimentaciones y pilotajes, como arcillas, bentonitas y demás. De la misma manera, se incluyen los residuos pétreos, que abarcan el

hormigón, las arenas, gravas, gravillas, cantos pétreos asfálticos, trozos de ladrillos y bloques, cerámicas, sobrantes de mezcla de cementos y concretos hidráulicos, entre otros. Y, por último, en este grupo, se encuentran los residuos no pétreos, que abarcan vidrio, acero, hierro, cobre, aluminio, con o sin recubrimientos de zinc o estaño, plásticos PVC, polietileno, policarbonato, acrílico, espumas de poliestireno y de poliuretano, gomas, cauchos, compuestos de madera, cartón-yeso, entre otros. El segundo grupo se divide en tres tipos de residuos que son: contaminados con residuos peligrosos, los que por su estado no pueden ser aprovechados y los que tengan características de peligrosidad, estos últimos se deben regir por la normatividad ambiental especial establecida para su gestión

La composición de los RCD varía dependiendo de las características regionales, el tipo de construcción y las prácticas de demolición empleadas para su obtención.

Es importante destacar que la industria de la construcción civil representa un gran desarrollo, pero al mismo tiempo genera una cantidad significativa de residuos. Por esta razón, la resolución en cuestión establece que los principales generadores de RCD deben contribuir a reducir el impacto ambiental que estos materiales generan, mediante el uso de hasta un 30% en peso de RCD aprovechables respecto al total de materiales empleados en la obra.

5.2- Agregados reciclados

Los agregados reciclados se obtienen a partir de la transformación de los residuos de construcción y demolición (RCD). Este proceso se inicia después de la demolición de una estructura. Primero, se lleva a cabo la recolección de los materiales, seguido del transporte hacia un lugar de acopio. Dado que los RCD pueden contener elementos como ladrillos, concreto, piedra, asfalto, materiales similares e incluso materiales contaminantes, es necesario realizar también un proceso de selección. Una vez completado este paso, los RCD se trasladan a una planta de aprovechamiento, donde se someten a diversas etapas de trituración para obtener finalmente el agregado reciclado (AR). En la mayoría de los casos, estos agregados reciclados están compuestos principalmente por concreto, debido a su alto potencial de uso en estructuras

Según el Instituto de desarrollo urbano de Bogotá IDU, la calidad de los AR depende de los procesos de tratamiento de las plantas de valorización, así como también de la correcta gestión de los procesos de construcción y demolición de las obras de donde proviene el RCD.

5.3- Impacto ambiental

El sector de la construcción produce una alta tasa de contaminación ya sea directa o indirectamente, lo que suscita una gran preocupación por sus efectos ambientales.

Esta industria requiere un alto consumo de recursos naturales, estimándose que a nivel mundial se utiliza aproximadamente el 40% de los recursos extraídos cada año. A su vez es, un potencial generador de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo entre un 25% y un 40% a las emisiones de carbono, según la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2021).

La construcción también tiene efectos perjudiciales en los ecosistemas derivándose en la destrucción de hábitats y la pérdida de biodiversidad. Además, tiene impactos negativos en los recursos hídricos. Otra preocupación importante es el alto consumo energético asociado a esta industria. Según datos presentados por la Comisión Europea y el World Economic Forum, el sector de la construcción es responsable del 40% del consumo energético a nivel global.

Uno de los problemas más significativos está relacionado con la generación de residuos. La producción de residuos de construcción y demolición es una fuente importante de contaminación, y está estrechamente vinculada a los aspectos mencionados anteriormente. Por ejemplo, países como Dinamarca, Finlandia, Alemania, Irlanda y Luxemburgo generan cantidades superiores a 2 toneladas de residuos por año, según datos proporcionados por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. En Colombia, se producen aproximadamente 22 millones de toneladas de RCD anualmente, siendo Bogotá la ciudad con la mayor producción de este tipo de residuos (Rodríguez y Terán, 2018).

Ante estos efectos, es necesario implementar medidas de mitigación. Una opción viable y sostenible es utilizar RCD transformados en AR como material de base y sub-base en carreteras. Este enfoque presenta

beneficios similares a los materiales convencionales y contribuye a la reducción de residuos enviados a los vertederos.

Además, según Ji y Wang (2023), la creciente demanda de recursos naturales agotables plantea uno de los principales desafíos para la industria global de pavimentos, lo que hace que la extracción y generación de estos materiales sea insostenible. En este contexto, la investigación realizada por Jiménez et al. (2012) evaluó el comportamiento e impacto ambiental de un agregado mixto reciclado obtenido de los RCD. Para ello, se construyó un camino rural sin asfaltar utilizando materiales previamente caracterizados en el laboratorio. Los resultados demostraron que los RCD seleccionados pueden reciclarse mediante un tratamiento sencillo, creando material reciclado con un bajo consumo de energía, que puede utilizarse como alternativa a los agregados naturales en caminos rurales no pavimentados.

De acuerdo con las especificaciones de dicho estudio, el contenido total de compuestos de azufre (SO₃) y sales solubles puede alcanzar el 3,9% y el 3,3%, respectivamente, sin representar un riesgo de lixiviación de sulfatos ni afectar la calidad de este tipo de trabajos. Estos estudios son importantes para aumentar las tasas de reciclaje de los RCD no seleccionados y respaldan el desarrollo sostenible y respetuoso con el medio ambiente en el sector de la construcción.

5.4- Normatividad

Varios países han establecido normativas para la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición con el fin de garantizar un manejo adecuado y reducir al mínimo los impactos ambientales. Estas especificaciones han permitido una gestión más eficiente de estos materiales, generando un impacto positivo tanto en la industria de la construcción como en el medio ambiente.

Es así como se han establecido criterios para la clasificación de RCD, su transporte y disposición final, con el propósito de que se haga una gestión adecuada. En Europa, las normas EN 12620 (2002), EN 13242 (2002) y EN 13139 (2002), para áridos de hormigón, capas granulares y morteros respectivamente, establecen los requisitos técnicos que debe tener un agregado reciclado para ser usado en pavimentación.

Por otro lado, la Comisión Europea en 2016, generó un “Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE”, donde se establece una estrategia para dar un uso eficiente a los recursos del sector de la construcción, generar una economía circular más novedosa, e implementar propuestas legislativas sobre el uso de residuos. En Estados Unidos, la EPA ha emitido una guía llamada “Directrices para el Uso Beneficioso de Materiales Reciclados en Carreteras y Obras de Construcción” para orientar el manejo de agregados reciclados; en este contexto, en Colombia, también se ha otorgado una importancia considerable a la gestión de los RCD en los últimos años; en tal medida, la Resolución 1257 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, emitida en 2021 por la cual se modifica la resolución 0472 de 2017, establece la gestión integral de estos materiales, impulsando la reutilización y reciclaje, y especificando los requerimientos técnicos para los procesos de manejo.

La resolución colombiana mencionada anteriormente tiene como objetivo minimizar el impacto ambiental causado por una gestión inadecuada de los residuos de construcción y demolición (RCD). En esta resolución se establecen los procedimientos necesarios para una gestión adecuada de estos residuos, incluyendo su aprovechamiento y disposición final, así como las responsabilidades de los generadores de RCD, los gestores, los municipios, los distritos y las autoridades competentes. También se establecen metas de aprovechamiento de RCD que deben ser alcanzadas por cada municipio. Además, se definen términos importantes y se establecen procesos específicos que deben ser seguidos para cumplir con este objetivo, tales como la prevención y reducción, la recolección y transporte, el almacenamiento, el aprovechamiento y la disposición final. La prevención y reducción se refiere a una planificación adecuada de la obra con el fin de evitar pérdidas de materiales, así como a la separación de los RCD según su tipo. En cuanto a la recolección y transporte, es importante realizarlos de manera cuidadosa para evitar la generación de nuevas fuentes de contaminación. El almacenamiento de los RCD debe llevarse a cabo en puntos limpios que no causen contaminación visual, ambiental ni de salubridad. En cuanto al aprovechamiento, este se debe realizar en plantas fijas o móviles que cumplan con los requisitos técnicos establecidos. Por último, la disposición final de los RCD es responsabilidad de los municipios o distritos, quienes deben identificar y designar los lugares adecuados para llevar a cabo esta acción.

También en el país, actualmente está vigente la norma del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) que establece los parámetros para el uso de base y subbase granular en vías vehiculares utilizando agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición. Esta norma abarca diversas actividades como el suministro, transporte, colocación, humedecimiento o aireación, extensión y conformación, compactación y terminado del material granular. Además, se estipula que los RCD utilizados deben contar con un documento que certifique su origen y verifique que sus características sean adecuadas.

La norma también establece los requisitos de calidad que deben cumplir los agregados, como la dureza, durabilidad, limpieza, forma de las partículas, capacidad de soporte y granulometría, estos ensayos que exige la norma IDU van referenciados a la norma INVIAS para base y subbase granular, exigiendo los mismos valores para su aceptabilidad. Asimismo, proporciona pautas sobre los equipos que deben utilizarse en este proceso, los requisitos para llevar a cabo el trabajo, las condiciones para la recepción de los trabajos e incluso las formas de pago.

A nivel local, en Bogotá, se ha desarrollado una Guía para la elaboración del plan de gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. Esta guía establece una serie de pasos para una gestión adecuada de los RCD. El primer paso es la demolición selectiva, que consiste en evitar la mezcla de materiales aprovechables con aquellos que no lo son, con el fin de evitar costos adicionales de separación y perjudicar las actividades de reutilización. El segundo paso es la reutilización, que implica que no todos los residuos deben ser transformados, ya que algunos pueden tener nuevas oportunidades de uso directo sin necesidad de transformación. El tercer paso es el reciclaje, que se aplica a aquellos residuos aprovechables que no pueden ser reutilizados directamente, y consiste en transformarlos en nuevos materiales. Por último, se aborda la gestión de residuos peligrosos, donde se implementa un plan específico para manejar de manera adecuada los residuos que presentan riesgos para evitar la contaminación de los materiales aprovechables. Este plan debe cumplir con la normatividad vigente.

La norma NTC 6422 expedida por el ICONTEC describe el proceso para determinar las proporciones relativas de los componentes de los RCD. Además, en la ciudad de Cali, tanto el DAGMA como el decreto

0771 del 2018 han establecido normas relevantes e innovadoras en este ámbito, definiendo los parámetros que deben seguirse para el reciclaje de los RCD.

5.5- Residuos de construcción y demolición usados en pavimentos

Actualmente, es necesario buscar nuevos materiales para la construcción de pavimentos debido a la escasez de recursos naturales, la estricta legislación ambiental y los numerosos requisitos para extraer los materiales. Además, es fundamental encontrar un uso y destino adecuado para los RCD, los cuales pueden reemplazar los agregados minerales para la construcción de estructuras de pavimento, previa transformación de estos es AR.

En ese sentido, los RCD se han mostrado útiles para diversos tipos de pavimentos, incluyendo los flexibles, rígidos, articulados y semirrígidos. Todos estos, requieren materiales granulares en su composición, y debido a las características de los RCD pueden ser utilizados como sustitutos en las capas de pavimento donde se requieren dichos materiales granulares. Al respecto, se resalta que para utilizar los RCD en la pavimentación es necesario procesarlos adecuadamente. Las tecnologías de procesamiento abarcan la clasificación, trituración y mezclado de residuos. La clasificación se utiliza para separar los residuos por tipo, tamaño y calidad. Posteriormente, los materiales son triturados para obtener el tamaño óptimo para su uso en pavimentación, y finalmente se mezclan para alcanzar la calidad necesaria para su aplicación.

Según lo presentado por Bastidas (2022), varios estudios han reportado el uso de RCD y ARC como materiales para obras de construcción de ingeniería civil, como capas de sub-base y bases para pavimentos. Asimismo, Ji y Wang (2023) exponen que la utilización de materiales reciclados o ya usados y agregados naturales proporciona una técnica de construcción económica, eficiente y sostenible sin comprometer las características de resistencia y durabilidad del pavimento. Según los mismos autores, el material secundario proporciona una técnica eficiente de eliminación de desechos, reduce la demanda de materiales convencionales y disminuye el costo total de construcción, a la vez que plantean que los pavimentos de asfalto y los desechos de construcción y demolición se encuentran entre las principales fuentes de agregados recuperados.

En la investigación de Li et al. (2019) se estudió el comportamiento dinámico (comportamiento dinámico de tensión-deformación y resistencia a la licuefacción) del agregado de concreto reciclado (RCA) y arena de cuarzo en condiciones no drenadas a través de pruebas triaxiales cíclicas y se realizó la respectiva comparación. Se observó que los RCA tienen una mayor resistencia a la licuefacción que la arena de cuarzo, lo que tuvo un efecto beneficioso sobre la respuesta al terremoto. Mientras tanto, debido a su mineralogía, los RCA fueron aplastados durante la carga cíclica, lo que disminuyó la resistencia a la licuefacción, especialmente bajo una mayor presión de confinamiento. Asimismo, fue posible determinar que los efectos de la triturabilidad de los RCA se discutieron sobre el comportamiento dinámico.

En la estructura de los pavimentos se pueden identificar distintas capas, pero son las de base y sub-base las que tienen la responsabilidad de soportar el peso del tráfico y distribuirlo hacia la capa inferior, que es la sub-rasante. Al respecto, Gómez y Farías (2012) indican que los agregados reciclados pueden ser utilizados para mejorar las condiciones de servicio de vías no pavimentadas, exponiendo ventajas técnicas en relación a los materiales naturales, puesto que los RCD desarrollan cohesión debido a la presencia de materiales puzolánicos. No obstante, es necesario considerar que las características fundamentales en la selección de un agregado reciclado son la absorción de agua –superior a la obtenida con agregados naturales– y la degradación de partículas generada durante el proceso de compactación (Álvarez et al., 2019), la cual puede comprometer la trabajabilidad de la estructura de pavimento (Gómez y Farías, 2012).

Estos parámetros se deben tener en cuenta cada que se vayan a emplear RCD en pavimentos. Ante esto, el estudio de Olivera (2017) –basado en investigaciones internacionales que buscan ser soporte para la actualización de especificaciones en sus respectivos países– establece fortalezas y debilidades en relación al tema del material reciclado. Además, la Resolución 2397 de 2011, en su última actualización de Especificaciones IDU ET-2011, se refiere al uso de agregados pétreos de construcción y demolición en bases y sub-bases.

En cuanto a la resistencia de los RCD, los valores de CBR y de MR encontrados tienen cierta relación con los de un agregado natural, pues se identificaron valores del ensayo de CBR hasta de 106% para residuos de hormigón (Leite et al., 2011). Por otro lado, Arm (2001) reporta en su estudio valores de MR que aumentan desde 310 KPa hasta 450 KPa después de un año de curado, incremento a la resistencia triaxial

cíclica que se atribuye a la activación del cemento presente no hidratado. También se encontraron rangos de 76% a 130% para diferentes lotes de agregados de CDW probados en diferentes tiempos de recolección después de cuatro días de inmersión. Estos valores mejoraron al aumentar el tiempo de remojo en el agua hasta 90 días en un rango de 138% a 185%, lo que podría deberse al potencial de unión restante del cemento en el concreto triturado (Pourkhorshidi et al., 2020).

Por su parte, Beja et al. (2020) realizaron un estudio sobre la viabilidad de utilizar RCD como agregado en pavimentos. Para ello, se llevaron a cabo distintas pruebas de laboratorio donde evaluaron el módulo resiliente y deformación permanente. Los resultados arrojaron que la estabilización de los RCD con cemento Portland o cal mejoró el comportamiento mecánico del material, reduciendo la variabilidad de las respuestas mecánicas. El laboratorio y los resultados de campo confirmaron que la rigidez de los agregados de RCD aumentó significativamente con el tiempo. Por lo tanto, concluyeron que los RCD podrían ser una alternativa para capas de sub-base de pavimentos bajo tráfico pesado.

En la investigación desarrollada por Sangiorgi et al. (2015) también se estudió la evolución de la rigidez de los materiales reciclados durante la construcción, así como su modificación con el tiempo. En ésta, se evaluó la correlación entre los sistemas de prueba y se experimentó con diferentes materiales reciclados. Los resultados evidenciaron que los agregados reciclados se comportaban de manera adecuada cuando eran correctamente compactados y presentaban propiedades positivas de auto-cementación.

A su vez, Pourkhorshidi et al. (2020) revisaron estudios referentes al uso de los agregados de RCD en capas no ligadas de pavimentos y compararon los resultados disponibles de varias evaluaciones de ingeniería de estos agregados y mezclas. Se aplicaron una serie de pruebas y evaluaciones para mejorar la calidad requerida y durabilidad de los pavimentos de volúmenes de tráfico, cargas de tráfico y acciones climáticas. En tal medida, concluyeron que los agregados reciclados no ligados se utilizaban principalmente en las capas inferiores, como la sub-rasante, el recubrimiento, la sub-base y la base, pero en carreteras rurales podían ser adoptados para capas ligadas, hacia la superficie de la estructura y ser constituyentes de capas ligadas y de nuevas aplicaciones de superficie.

Por su lado, Villate (2020) estableció un diseño de estructura de vía en pavimento flexible que respondiera a las condiciones propias del terreno, el clima y las exigencias del nivel de tránsito de una vía urbana en la ciudad de Bogotá. Para ello, empleó una capa granular proveniente de materiales RCD suministrado por el proveedor Granulados Recicladados de Colombia. En el proceso se determinó que el material era apto para ser utilizado como sub-base, ya que cumplía con los requerimientos descritos en la Norma del INVIAS, artículo 320, en cuanto a condiciones de granulometría, dureza, limpieza y capacidad de soporte. Según los autores, esta implementación representa una importante oportunidad para el desarrollo sostenible en la construcción y puede generar una gran cantidad de beneficios.

Finalmente, Petkovic et al. (2004) plantean que todas las estructuras que conforman un pavimento pueden construirse con materiales reciclados, lo cual significa que la carpeta asfáltica, la base granular, la sub-base granular, el refuerzo de la sub-rasante, los drenajes subterráneos y las barreras anti-ruídos son idóneos para darle otro uso a estos materiales. En tal sentido, en España se ha incrementado la construcción de sub-bases y terraplenes de carreteras con áridos reciclados (AR), demostrando que si el material RCD es de buena fuente y pasa por un proceso de selección adecuado se puede utilizar en bases y sub-bases de pavimentos (Agrela et al., 2012).

5.6 CBR

El ensayo de CBR se utiliza para evaluar la resistencia de un suelo en comparación con una muestra patrón con características especiales. Se mide la presión necesaria para que un pistón estándar penetre en el suelo, así como la presión requerida para que el mismo pistón penetre en una muestra patrón de suelo compactado. Es decir, se mide la resistencia al suelo al ser sometido a una carga axial.

Es un ensayo crucial, ya que determina la capacidad de carga del suelo y su comportamiento en estas condiciones.

5.7 Módulo resiliente

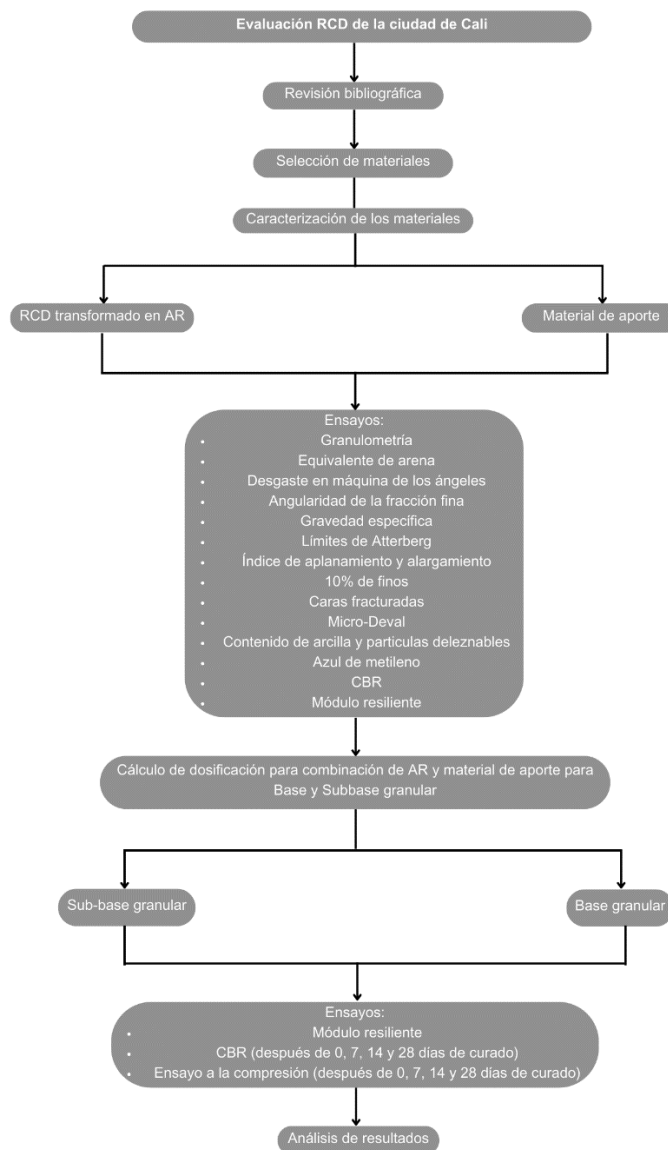
Como expresa Miranda (2019), el módulo resiliente es una medida de la capacidad de un material de almacenar o absorber energía sin que este experimente una deformación permanente. Este se determina mediante ensayos triaxiales de carga repetida y es un parámetro importante en el análisis y diseño de

pavimentos flexibles. Con su valor es posible predecir la respuesta mecánica del pavimento como esfuerzos, deformaciones y deflexiones.

6- Metodología

Para desarrollar la investigación, resulta fundamental seguir un proceso ordenado, tal como se resume en la Figura 1. Posteriormente, se proporcionan descripciones detalladas de cada uno de los pasos para facilitar su comprensión y ejecución. Así mismo, se expone una descripción minuciosa de los materiales estudiados durante el proceso de investigación.

Figura 1- Etapas de la investigación



Fuente: elaboración propia.

6.1- Revisión bibliográfica

Para respaldar la hipótesis respecto a la idoneidad de los AR como material para pavimentos, se recolectó la información mediante la búsqueda exhaustiva en bases de datos, artículos académicos, revistas, consulta con expertos y demás fuentes relevantes.

6.2- Selección de materiales

La investigación identificó los materiales de estudio, por una parte, los RCD de la ciudad de Cali, que en su mayoría se acopian en la escombrera de la 50, lugar de donde se tomaron todas las muestras de estudio, allí se pueden encontrar residuos de edificios, viviendas, carreteras y cualquier tipo de construcción; estos residuos se recolectaron de dicho lugar, previamente evaluando la forma adecuada de obtenerlos, asegurando su calidad y representatividad mediante el seguimiento de los cuidados necesarios y procedimientos estandarizados recomendados para su adquisición, escogiendo los que habían sido clasificados en el lugar como residuos que su mayor componente era el concreto; se sometieron a un proceso de selección y trituración en la planta de la empresa Rocales y Concretos de la misma ciudad, y se transformaron en AR. Por otra parte, se seleccionó el material de aporte que se consideraba necesario para mejorar algunas características del AR, este se adquirió de la planta el Aguacatal de la misma ciudad, donde se hace el debido procesamiento para un material natural.

6.3- Caracterización de los materiales

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo tanto del material de aporte como de los AR con el objetivo de determinar si cumplían con las propiedades necesarias para su uso en la construcción de pavimentos. De igual manera, para garantizar la validez de los resultados, se implementaron medidas que minimizaran los posibles errores y se continuó con los procedimientos estandarizados para la correcta ejecución. Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales de construcción y en el laboratorio de pavimentos de la Universidad del Cauca.

6.3.1- Residuos de construcción y demolición

La investigación se enfocó en analizar los RCD específicamente de concreto generados por proyectos de construcción y demolición en la ciudad de Cali. La obtención de estos inicia con la demolición de la obra,

la cual debe hacerse de manera selectiva para evitar la mezcla de materiales peligrosos o indeseados que puedan contaminar los RCD. Después, se hace el transporte de estos residuos a la escombrera de la 50, el principal lugar de acopio de residuos en la ciudad y de donde se obtuvieron las muestras para esta investigación. Allí, los RCD se almacenan en puntos limpios donde se clasifican manualmente según su tipo. Posteriormente se realizó el transporte de residuos cuya mayor composición era hormigón a la planta trituradora de la empresa Rocales y Concretos, ubicada en la misma ciudad. Dicha empresa cuenta con un riguroso proceso de gestión de reciclaje para asegurar que los RCD sean procesados de forma adecuada y se transformen en AR para su reutilización como materiales de construcción. En la ilustración 1 se puede visualizar un ARC cuya composición mayoritaria es concreto.



Ilustración 1- Residuos de construcción y demolición de Cali

Fuente: autoría propia.

Una vez en la planta de aprovechamiento, el material se somete a dos etapas de trituración con tecnología especializada Telsmith Barber Greene. En la ilustración 2 se muestra la planta trituradora de la empresa Rocales y Concretos.



Ilustración 2- Trituradora de la Empresa Rocales y Concretos S.A.S

Fuente: autoría propia.

La trituración primaria se realiza con un alimentador vibratorio V6F de 42"x14" con parrilla de precibado y un motor de 25 hp. Posteriormente, el material pasa por una trituradora primaria de mandíbulas de 25"x40" con un motor de 150 hp y una capacidad de 160 toneladas por hora. Después de este proceso, el material se clasifica en una zaranda vibratoria de 5"x16" con un motor de 30 hp, preparándolo así para la siguiente fase de molturación.

La trituración secundaria se lleva a cabo mediante un cono de trituración S48 con un motor de 150 hp, que cuenta con una banda primaria con un motor de 15 hp, una banda alimentadora con motor de 20 hp, dos bandas de retorno con motores de 5 hp y 10 hp y dos bandas apiladoras con motores de 10 hp, que finalmente clasifican el material de acuerdo a su tamaño dejándolo listo para ser utilizado. La ilustración 3 muestra un AR de concreto al salir de la planta de trituración.

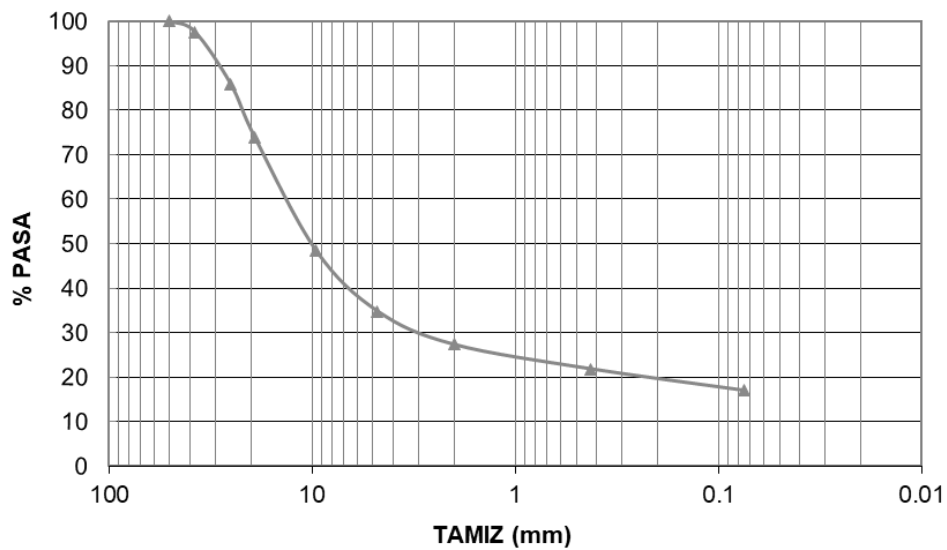


Ilustración 3- Material ARC

Fuente: autoría propia.

La granulometría del material al salir de la planta se representa en la gráfica 1.

Gráfica 1- Semi-logarítmica de granulometría ARC



Fuente: elaboración propia.

Los AR son generalmente una mezcla de varios materiales. Para obtener una comprensión detallada de la composición de los residuos en estudio, se realizó una inspección minuciosa pesando una muestra de 7.500 g y separándolos según sus características. Los resultados mostraron que el 72% de los residuos

consistían en concreto, el 27% en agregado y el 1% en ladrillos. Esta información se presenta en la gráfica 2 resumida a continuación:

Gráfica 2- Porcentajes de materiales



Fuente: elaboración propia.

6.3.2- Material de aporte

Los agregados empleados para base y sub-base granular de pavimentos deben cumplir con aspectos técnicos y características especiales para su uso. En la ciudad de Cali, específicamente en el Aguacatal, se encuentra una fuente confiable de agregados diabásicos y basálticos de origen volcánico que cumplen con la Norma Técnica Colombiana 174 y el Capítulo 4 de 2013 del INVIAS. Tal información fue proporcionada por la empresa Rocales y Concretos, proveedor de estos materiales, y se consideró necesaria para mejorar la calidad de la base y sub-base granular en el estudio de los ARC. En la ilustración 4 se presenta una muestra de agregado natural.

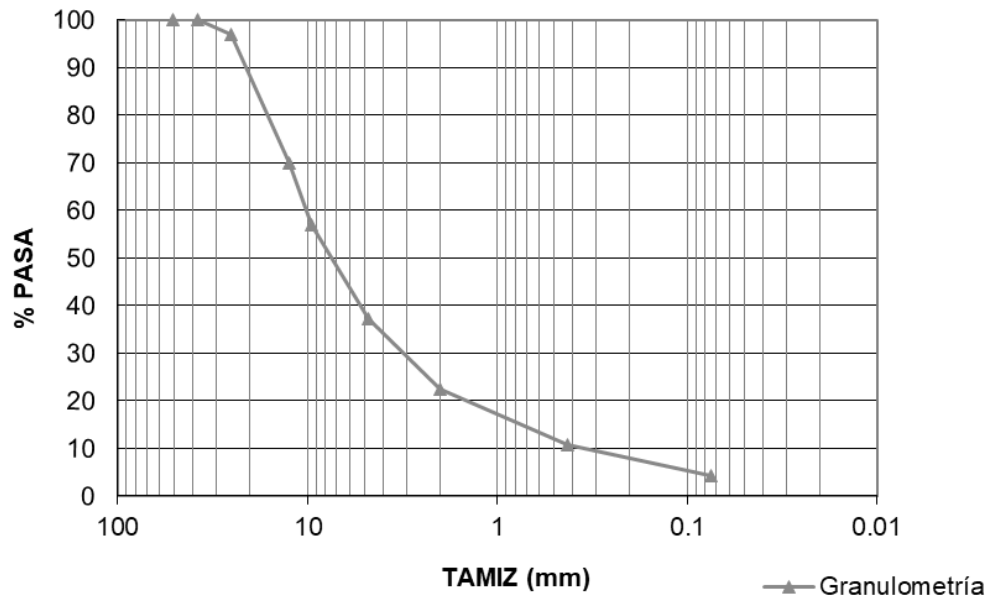


Ilustración 4- Agregado natural utilizado en el proyecto

Fuente: autoría propia

La gráfica 3 muestra la granulometría del agregado de aporte

Gráfica 3- Semi-logarítmica de granulometría



Fuente: elaboración propia.

6.4- Ensayos para el material ARC y el agregado de aporte

Se realizó la caracterización del material de construcción y demolición transformado en agregado de concreto reciclado, así como también del material de aporte, ya que éste se consideró como una opción para mejorar las características de calidad que los ARC no llegasen a cumplir al realizar los ensayos de laboratorio. Tal proceso involucró pruebas para determinar sus propiedades físicas, mecánicas y químicas; los ensayos realizados fueron granulometría, equivalente de arena, ensayo de abrasión en la Máquina de los Ángeles, angularidad de la fracción fina, gravedad específica, límites de Atterberg, índice de aplanamiento y alargamiento, ensayo de 10% de finos, ensayo de caras fracturadas, ensayo Micro-Deval, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable y ensayo de azul de metileno. Se consideraron estos ensayos porque son los regularmente exigidos en los parámetros de la normativa del INVIAS ya que es la norma que rige las condiciones de materiales de base y subbase granular usados en pavimentos y también se analizaron los resultados con la normativa del IDU que exige unos valores semejantes a los del INVIAS y es la norma vigente que regula el uso de este tipo de materiales en pavimentación; además de éstos, también se realizó el ensayo de CBR y módulo resiliente para determinar características más específicas y determinantes de cada uno de los materiales.

6.4.1- Granulometría

El ensayo de granulometría se realiza para determinar la composición cuantitativa de las diferentes partículas que están presentes en un agregado, obteniendo la curva granulométrica y, así, la composición del material. La granulometría de los ARC se determina mediante tamizado, donde el material se pasa a través de elementos con diferentes aberturas que van desde 2", 1 ½", 1", 3/8", #4, #10, #40 hasta una abertura #200.

Los valores obtenidos para este caso se ajustaron a la granulometría de una sub-base tipo SBG-50 y una base tipo BG-40.

La ilustración 5, muestra parte del tamizado del material en laboratorio.



Ilustración 5- Tamizado del material (granulometría)

Fuente: autoría propia.

La ilustración 6, muestra material ARC pasante del tamiz # 200.



Ilustración 6- Pasante Tamiz 200 de ARC por lavado

Fuente: autoría propia.

Para el material de aporte se realizó el mismo procedimiento.

En la ilustración 7 se puede visualizar el material de aporte en el ensayo de granulometría.



Ilustración 7- Granulometría del material de aporte

Fuente: autoría propia.

6.4.2- Equivalente de arena

La limpieza del material se evalúa mediante el ensayo de equivalente de arena, el cual es importante para conocer la relación entre el volumen ocupado por la parte arenosa de una muestra y el volumen total de una muestra de agregado fino, pues la presencia de elevadas cantidades de material arcilloso puede interferir en la adherencia del agregado con otros materiales. Según la norma INV-133 se considera un material limpio y apto para implementación en la construcción de vías aquel cuyo porcentaje de arena sea mayor al 25% si se utiliza para sub-base y superior al 30% para base.

En la ilustración 8 se puede observar el ensayo de equivalente de arena al cual se sometió el ARC.



Ilustración 8- Probetas del ensayo de equivalente de arena para ARC

Fuente: autoría propia.

En la ilustración 9 se muestra el ensayo de equivalente de arena realizado al agregado de aporte.



Ilustración 9- Ensayo de equivalente de arena para agregado de aporte

Fuente: autoría propia.

6.4.3- Desgaste en Máquina de los Ángeles

Los materiales se ven sometidos a desgaste por procesos de erosión, explotación, almacenamiento, transporte, construcción y servicio, sufriendo cambios en su estructura y generando una pérdida de masa. Es por ello que se debe realizar una simulación de los fenómenos para evaluar su comportamiento en condiciones críticas.

El material con una granulometría estándar se lavó, se secó en el horno y se introdujo junto con una carga abrasiva en un tambor cilíndrico de características normalizadas. Allí se aplicaron fuerzas de compresión, impacto y fricción, las cuales producen el desgaste o alteración de la granulometría en una intensidad que depende de las características y grado de alteración del material. Todo este proceso bajo las condiciones exigidas por la INV-E 218.

La ilustración 10, muestra el ensayo de desgaste del ARC en la máquina de los ángeles.



Ilustración 10- Desgaste del ARC en la Máquina de los Ángeles

Fuente: autoría propia.

La ilustración 11 muestra el desgaste en la máquina de los ángeles del agregado de aporte.



Ilustración 11- Desgaste del material de aporte en la Máquina de los Ángeles

Fuente: autoría propia.

6.4.4- Angularidad de la fracción fina

Para este proceso, se utilizó el método A de la INV 239, considerando que la forma y la textura de las partículas tienen gran influencia en el comportamiento y la resistencia del material al ser mezclado con otros, o al momento de su compactación.

Se puede observar el ensayo de angularidad de la fracción fina del ARC en la ilustración 12.



Ilustración 12- Ensayo de angularidad de la fracción fina para el ARC

Fuente: autoría propia.

En la ilustración 13 se muestra el ensayo de angularidad de la fracción fina realizado al material de aporte.



Ilustración 13- Ensayo de angularidad de la fracción fina del material de aporte

Fuente: autoría propia.

6.4.5- Gravedad específica

La densidad se define como la relación entre el peso de un volumen de material en el aire y el peso del mismo volumen en agua a una temperatura determinada. Este parámetro tiene gran importancia en la caracterización de un material, puesto que su valor puede llegar a representar la resistencia, durabilidad y utilidad para el cálculo de combinaciones con otros materiales. En la INV-E 222 e INV-E 223 se encuentran los pasos adecuados a realizar, las cuales sirvieron de base para este proceso.

La ilustración 14 muestra una parte del proceso de este ensayo para el ARC.

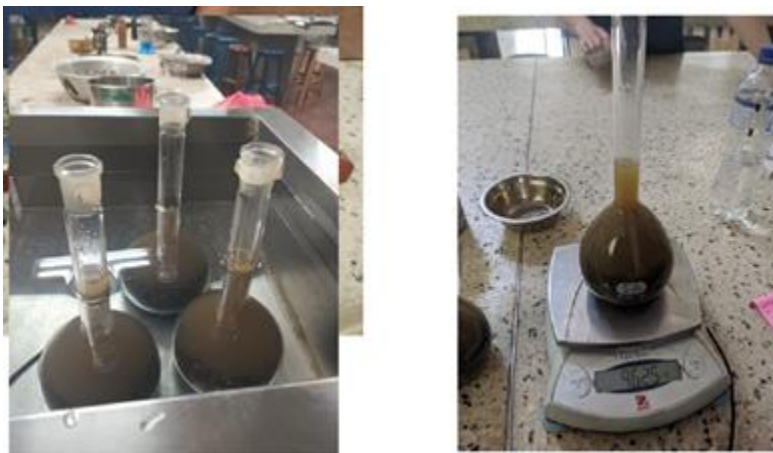


Ilustración 14- Ensayo de gravedad específica para la fracción fina de ARC

Fuente: autoría propia.

La ilustración 15 muestra parte del ensayo de gravedad específica para la fracción gruesa del ARC.



Ilustración 15- Ensayo de gravedad específica para la fracción gruesa de ARC

Fuente: autoría propia.

En la ilustración 16 se puede visualizar el agregado de aporte siendo sometido al ensayo de gravedad específica.

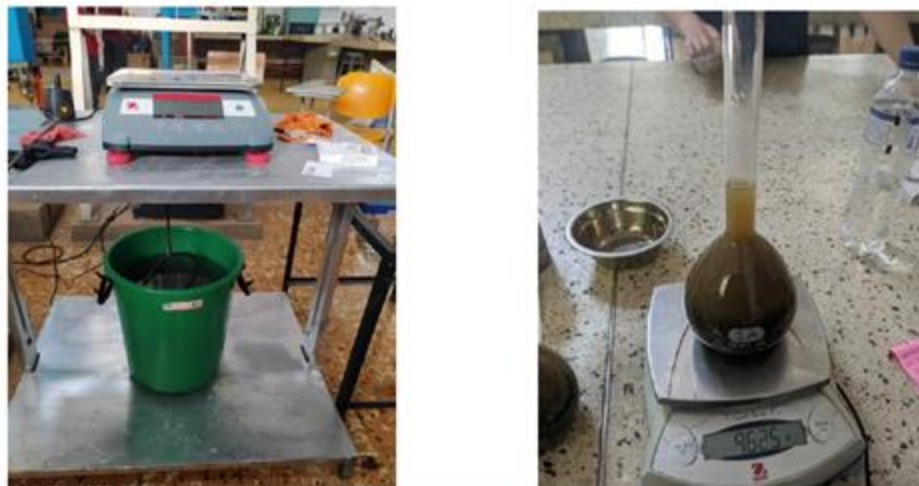


Ilustración 16- Ensayo de gravedad específica del agregado de aporte

Fuente: autoría propia.

6.4.6- Límites de Atterberg

En 1991, Atterberg observó que el comportamiento de los suelos cambia según su contenido de agua, y propuso cuatro estados básicos del suelo: líquido, plástico, semisólido y sólido. Los límites de Atterberg son las fronteras de humedad en las que un suelo cambia de un estado a otro, y se dividen en límite líquido, plástico y de contracción. Estos límites son propios de cada suelo, pues dependen de su composición mineralógica, capacidad de intercambio catiónico y fuerzas electromagnéticas. Esta singularidad permite describir el comportamiento del material. En el laboratorio se midieron los límites de Atterberg siguiendo las INV E-125 e INV E-126.

Se puede observar el ensayo de límites de Atterberg para el ARC en la ilustración 17.



Ilustración 17- Ensayo de límites de Atterberg para ARC

Fuente: autoría propia.

La ilustración 18 muestra el ensayo de límites de Atterberg para el material de aporte.



Ilustración 18- Ensayo de límites de Atterberg para material de aporte

Fuente: autoría propia.

6.4.7- Índice de aplanamiento y alargamiento

La forma de las partículas influye en el proceso de compactación y en la resistencia del pavimento, pues las partículas consideradas como ideales son la que poseen poco aplanamiento y alargamiento, ya que no son propensas a fracturarse. Para este ensayo se empleó la norma INV-E 230.

Los utensilios para el ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento del ARC se pueden visualizar en la ilustración 19.



Ilustración 19- Índice de aplanamiento y alargamiento de partículas de ARC

Fuente: autoría propia.

La ilustración 20 muestra el ensayo de índice de alargamiento y aplanamiento para el material de aporte.



Ilustración 20- Índice de aplanamiento y alargamiento de material de aporte

Fuente: autoría propia.

6.4.8- Ensayo de 10% de finos

Con esta prueba se busca medir la resistencia mecánica de un agregado grueso al ser sometido a la trituración por un esfuerzo de compresión necesario para producirle el 10% de partículas finas pasantes del tamiz #8.

Ambos materiales se sometieron a este ensayo basándose en la norma INV-E 224.

La ilustración 21 muestra algunos pasos realizados en el ensayo de 10% de finos para el ARC.



Ilustración 21- Ensayo de 10% de finos para material ARC

Fuente: autoría propia.

En la ilustración 22 se puede visualizar el ensayo de 10% de finos realizado al material de aporte.



Ilustración 22- Ensayo de 10% de finos para material de aporte

Fuente: autoría propia.

6.4.9- Ensayo de caras fracturadas

El objetivo de este ensayo es clasificar el material de acuerdo a su número de aristas para realizar un análisis de los porcentajes que se tienen de cada una de acuerdo a su dimensión. Las partículas cúbicas y con aristas vivas se consideran las indicadas para su empleo, puesto que maximizan la resistencia al corte debido a su incremento en la fricción y dan estabilidad a los agregados. En el ensayo se debe tener especial cuidado, ya que una parte de éste se hace de manera cualitativa, por lo cual es susceptible de cambios dependiendo del laboratorista. El ensayo se llevó a cabo siguiendo las especificaciones de la INV-E 227.

La ilustración 23 muestra parte del ensayo de caras fracturadas para el ARC.



Ilustración 23- Caras fracturadas de ARC

Fuente: autoría propia.

6.4.10- Ensayo Micro-Deval

La evaluación de la resistencia a la abrasión y durabilidad de los agregados se midió en el equipo Micro-Deval, donde se combinaron efectos de abrasión y molienda con bolas de acero en presencia de agua rigiéndose por los parámetros técnicos de la INV E-238. Esto, con el objetivo de someter los materiales a condiciones similares a las de uso.

6.4.11- Contenido de arcilla y partículas delezables

El alto contenido de arcilla y partículas finas puede afectar negativamente la calidad del pavimento, ya que interfiere en su compactación, resistencia, plasticidad, estabilidad y asentamientos, así como en su drenaje y filtración. Es importante controlar el contenido y conocer el porcentaje de estos materiales en el agregado, para evitar características desfavorables en la obra. Por lo tanto, se realizó la medición de estas partículas siguiendo los lineamientos establecidos en la INV-E 211.

6.4.12- Azul de metileno

Los agregados deben ser analizados en cuanto a la cantidad de materia orgánica presente. Dicho estudio es fundamental, porque se puede afectar la capacidad de carga, estabilidad, durabilidad y, por tanto, resistencia de éstos. El ensayo de azul de metileno mide el cambio de color de la mezcla con un material, donde a medida que haya más presencia de materia orgánica el azul de metileno será consumido, disminuyendo su color. Tal ensayo se desarrolló siguiendo las especificaciones de la INV-E 235.

En la ilustración 24 se puede visualizar parte del procedimiento del ensayo de azul de metileno para el ARC.



Ilustración 24- Ensayo de azul de metileno para ARC

Fuente: autoría propia.

En la ilustración 24 se puede observar el agregado de aporte siendo sometido al ensayo de azul de metileno.



Ilustración 25- Ensayo de azul de metileno para agregado de aporte

Fuente: autoría propia.

6.4.13- Ensayo de CBR

Es una técnica empleada en ingeniería civil para evaluar la capacidad de carga de los suelos. Consiste en medir la resistencia que ofrece un suelo a la penetración de un pistón de tamaño y forma estandarizados mediante la aplicación de una carga constante sobre una muestra compactada en un molde. Los valores obtenidos de esfuerzo versus penetración se analizan posteriormente para determinar el índice de CBR, lo cual indica la relación entre la carga necesaria para producir una determinada penetración en el suelo y la carga necesaria para generar la misma penetración en un suelo de referencia. Este ensayo se rige bajo la INV E-148.

La ilustración 26 muestra ciertos pasos del procedimiento para el ensayo de CBR.



Ilustración 26- Ensayo de CBR

Fuente: autoría propia.

6.4.14- Módulo resiliente

Este ensayo tiene como objetivo medir la capacidad de los materiales para trabajar en el campo elástico, es decir, su capacidad para sufrir deformaciones recuperables. A través del ensayo de módulo resiliente se mide la resistencia del material a las deformaciones repetidas y elásticas, simulando el efecto del tráfico vehicular. De tal manera, se puede obtener una idea de su capacidad para recuperarse después de sufrir este tipo de fenómenos. Durante el ensayo, se somete el material a una serie de cargas repetidas y se miden los valores de deformación en cada ciclo de carga. Para realizar esta prueba, el INVIAS pone a disposición la INV E-156.

6.5- Cálculo de dosificación para combinación de ARC y material de aporte para base y sub-base granular

La dosificación de los dos materiales en estudio busca mejorar la calidad de los ARC, con el fin de utilizarlos como base y sub-base granular en la construcción de pavimentos. Después de caracterizar tanto el ARC como el material granular de aporte, evaluando mediante los ensayos mencionados anteriormente su idoneidad como base y sub-base de pavimentos, se procede a calcular la dosificación necesaria para su combinación. De esta forma, se garantiza que el material final tenga las características adecuadas, de acuerdo con las normas del INVIAS. Para determinar estas proporciones, se llevó a cabo una dosificación basada en el peso, con el objetivo de ajustar la curva granulométrica del material. Esto se logró mediante la combinación del ARC y la adición de material para corregir las discrepancias observadas en los límites superior e inferior tanto para el caso del ARC como para el agregado de aporte.

6.6 Ensayos del INVIAS para los ARC combinado con material de aporte como sub-base y base granular

Una vez caracterizado el material ARC, el material de aporte y realizar las determinaciones de sus proporciones para que funcionen como una base y sub-base para pavimento, se llevaron a cabo ensayos críticos en laboratorio. Estos incluyeron módulo resiliente, CBR y resistencia a la compresión. Para estos dos últimos se realizaron ensayos en especímenes a los 0, 7, 14 y 28 días de inmersión, con el objetivo de determinar la viabilidad de su uso en un pavimento, identificar características a mejorar y evaluar la posible influencia del cemento remanente en las muestras en la resistencia, al entrar en contacto con agua, condición que sería muy relevante en el estudio.

6.6.1- Módulo resiliente

Se siguió el mismo proceso que en el numeral 6.4.14.

6.6.2 CBR a los 1, 7, 14 y 28 días

Para este ensayo se llevaron a cabo los mismos procedimientos que en el numeral 6.4.13 con la distinción de que los materiales estuvieron 1, 7, 14 y 28 días en inmersión antes de realizar la prueba. Es importante tener en cuenta que el ensayo de CBR compara una muestra de suelo, con una muestra patrón, que no

contiene cemento, lo cual difiere de esta investigación, sin embargo, este ensayo se hizo netamente con el fin de evaluar si la presencia de material cementicio conduce a un aumento en la resistencia a la penetración, que es la medida obtenida mediante el ensayo CBR.

6.6.3- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días

Debido a que los AR bajo estudio se componen principalmente de concreto, se llevó a cabo el ensayo de compresión en diferentes intervalos, para evaluar la respuesta mecánica del material ante cargas y deformaciones por compresión, y para determinar si el concreto presente en el material aumenta su resistencia con el tiempo. Este ensayo se consideró uno de los más relevantes en la investigación.

Sin embargo, dado que la norma técnica INVIAS no incluye este ensayo en sus especificaciones para la base y subbase granular, se ha desarrollado un método que consiste en someter a carga axial probetas moldeadas. Este método tiene en cuenta el tamaño máximo nominal del agregado y lo utiliza como un estabilizante para el suelo cemento. Para desarrollar este método, se ha tomado como referencia el método de estabilización de suelo cemento del Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC) y la norma INV-E 353-13.

Como primer paso, para la elaboración de las probetas de ensayo, se definió un molde con un diámetro de 6" y una altura de 7", cumpliendo la relación de esbeltez calculada por el método del ICPC de estabilización de suelo cemento. Luego, se determinó la curva de compactación máxima y la humedad óptima para el material en estudio, empleando los métodos establecidos en las normas INV-E 141-13 y INV-3 142-13, la cual define la humedad en la que se compactan las probetas de ensayo, en este caso se determinó con la energía de compactación del ensayo Proctor modificado en la probeta de trabajo ya definida, se utilizó un martillo de compactación de 10 libras y una altura de caída de 18" (que cumple con la norma INV-E 142-13).

Posteriormente, la probeta se lleva a una cámara de curado (sin inmersión) hasta la edad de rotura, evitando sacar la muestra del molde hasta el día de ensayo (opcional) para evitar que esta se rompa durante la extracción de la probeta; Esta cámara debía cumplir con las condiciones de almacenamiento especificadas en la norma INV-E 613-13, que establece una temperatura y humedad relativa de almacenamiento de 23 +/- 1.5° C y 96% de humedad relativa. Finalmente, se lleva la probeta previamente

extraída al equipo de ensayo y se registra el esfuerzo último que alcanza en su punto de rotura; utilizando la velocidad de compresión establecida en la norma INV-E 614-13 (20+/-10 lbf/pg2/s).

En la ilustración 27 se puede observar parte del proceso del ensayo a la compresión en distintos días.



Ilustración 27- Ensayo de resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días

Fuente: autoría propia.

6.7- Análisis de resultados

Se hizo la interpretación de los resultados obtenidos durante todo el proceso de estudio.

7- Resultados y análisis de resultados

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados, incluyendo el nombre, número de la especificación técnica del INVIAS que lo rige y los valores obtenidos tanto para el material ARC como para el material de aporte, también se presenta una comparación con la normativa del IDU, que es importante para determinar la aceptabilidad del material según esta norma.

7.1- Granulometría ARC

A continuación, se presentan los valores obtenidos de porcentajes retenido, retenido acumulado y porcentaje pasa para el material ARC para cada tamiz en la tabla 3.

Tabla 1- Granulometría del material ARC

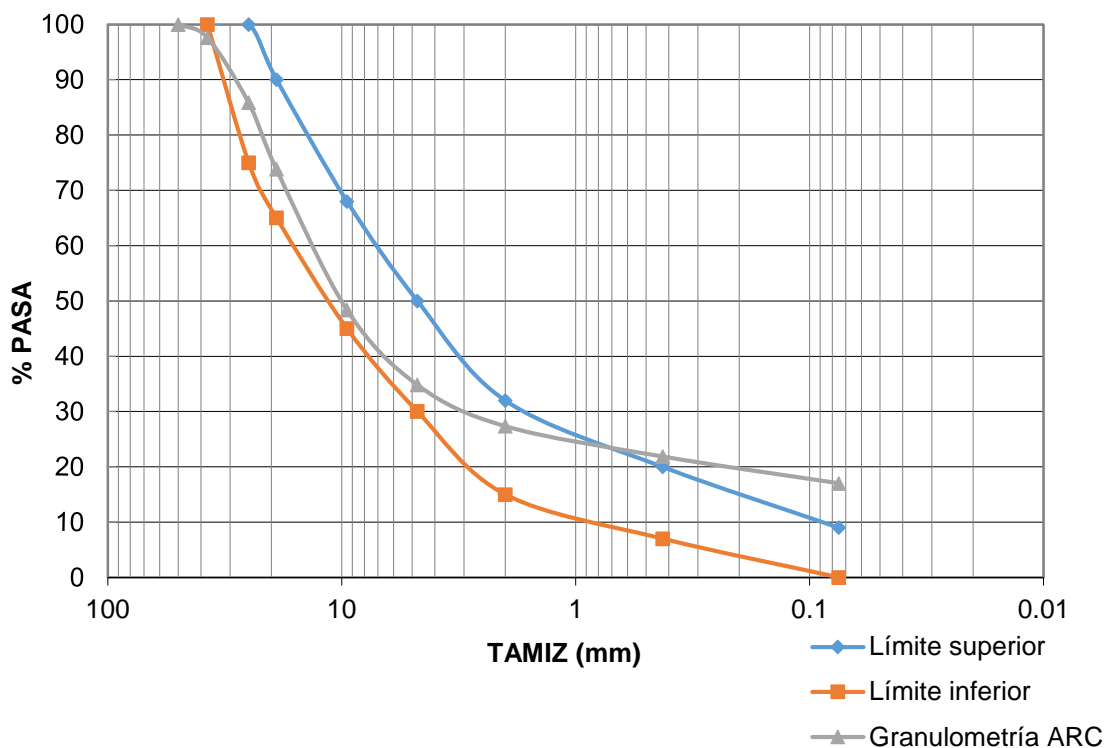
Tamiz (mm)	Retenido (%)	Pasa (%)
50		100
37.5	2.4	97.6
25	11.7	85.9
19	12	73.8
9.5	25.4	48.4
4.75	13.6	34.8
2	7.5	27.3
0.425	5.5	21.8
0.075	4.8	17
Pasa 0.075	17	0

Fuente: elaboración propia.

El material posee una granulometría gruesa, puesto que presenta un porcentaje retenido acumulado en la malla de abertura de 4.75 mayor al 50%.

En la gráfica 4, se presenta la granulometría del ARC comparada con la de una BG-40, que fue la granulometría a la cual más se asemejó el material para una base granular recomendada por la especificación de base granular del artículo 330, Capítulo 3 de la norma INVIAS, donde se puede observar que, aunque la granulometría del material se ajusta a la franja granulométrica mencionada, no cumple exactamente con este rango de la especificación, ya que la granulometría del material de ARC posee partículas con sobre tamaños.

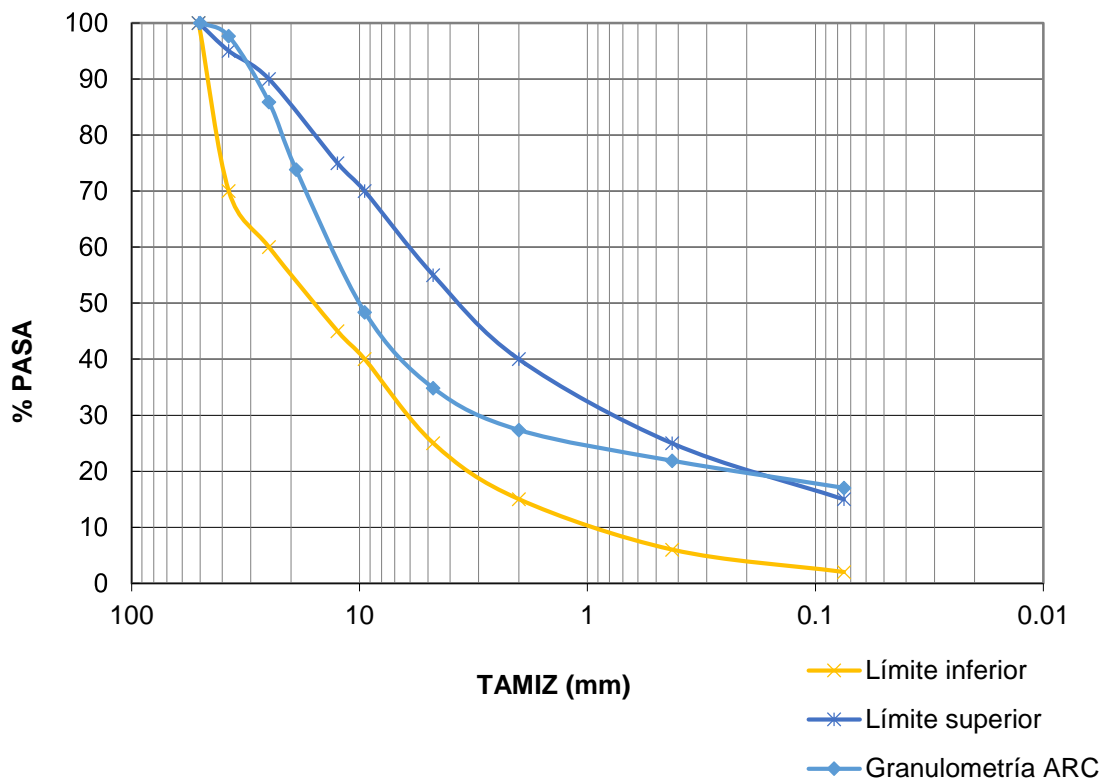
Gráfica 4- Análisis granulometría con la de una base granular BG-40



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 5 se presenta la comparación de la granulometría del material ARC con la de una SBG-50 recomendada por la especificación de sub-base granular del artículo 320, Capítulo 3 de la norma INVIAS. Se realizaron comparaciones con otros tipos de sub-bases granulares y se determinó que esta opción tenía un mejor ajuste. Sin embargo, se debe prestar especial atención a los porcentajes de los tamaños de partículas en las mallas de 4.75 mm y 9.50 mm, ya que se encuentran muy cerca del límite inferior de la granulometría seleccionada.

Gráfica 5- Análisis granulometría con la de una sub-base granular SBG-50



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a este análisis, se puede decir entonces que es necesario utilizar un agregado para mejorar la granulometría del material y así evitar puntos críticos de ésta en las franjas granulométricas para sub-base y base; aunque el material pasa por un proceso de trituración donde se asume que se podría ajustar la granulometría a la requerida, se reconoce que esta acción no es posible, debido a limitaciones por las condiciones técnicas del equipo.

Se recomienda un material de tamaño máximo de 19 mm para compensar tales falencias presentadas en las dos franjas granulométricas. Igualmente, se sugiere que se retire el material retenido por la malla de 37.5 mm para considerar el agregado para trabajos de base para pavimentos.

7.2- Granulometría del material de aporte

En la tabla 4, se puede visualizar la granulometría del material de aporte después de haber llevado a cabo el respectivo ensayo

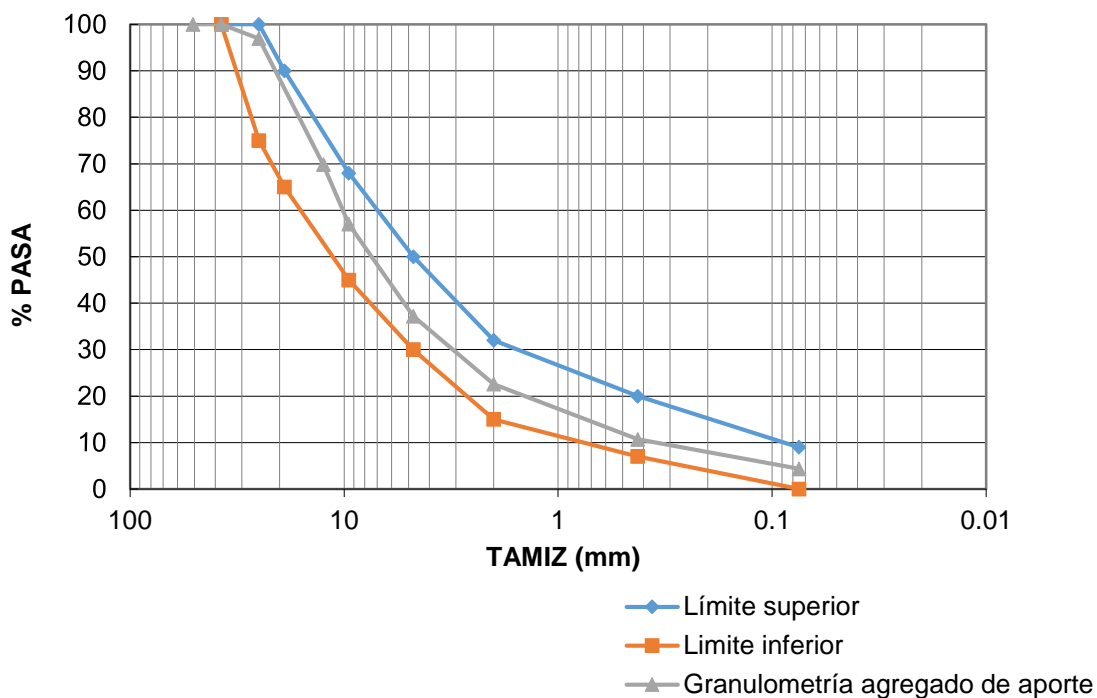
Tabla 2- Granulometría del material de aporte

Tamiz (mm)	Retenido (%)	Pasa (%)
50.8		100
37.5	0	100
25	3	97
12.5	27.1	69.8
9.5	12.8	57
4.75	19.8	37.2
2	14.6	22.6
0.425	11.9	10.7
0.075	6.3	4.3
pasa 200	4.4	0

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 6, se presenta la granulometría del material de aporte comparada con la de una BG-40, que fue a la granulometría a la cual más se asemejó para una base granular. Se puede visualizar que el material tiene una granulometría que se ajusta de una manera muy adecuada a la escogida.

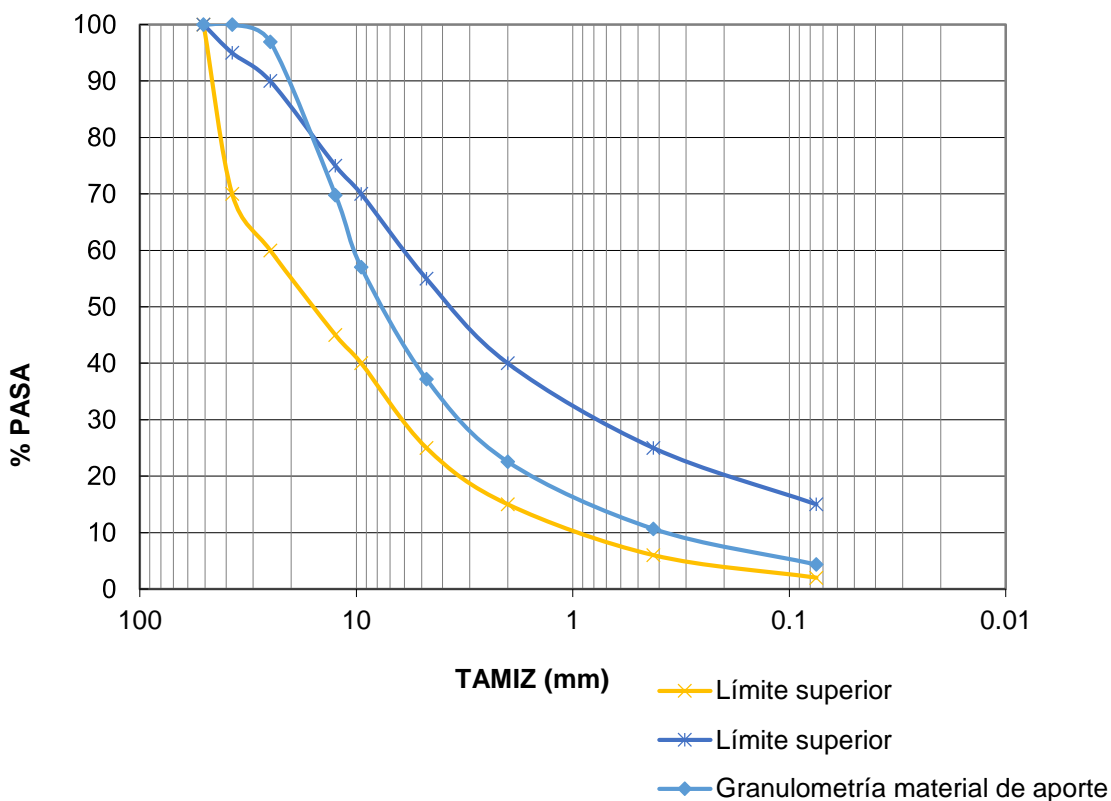
Gráfica 6- Análisis granulometría con la de una base granular BG-40



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 7, se presenta la granulometría del material de aporte comparada con la de una SBG-50, que fue la granulometría a la cual más se ajustó para una subbase granular. Se identifica presencia de material retenido en la malla de 25 mm de abertura, pero debido a que es menor del 5%, éste no se contempla como tamaño máximo nominal de la muestra ensayada.

Gráfica 7- Análisis granulometría con la de una sub-base granular SBG-50



Fuente: elaboración propia.

Es así, como se evidencia que el material de aporte suministrado, cumple en la mayoría de su granulometría con las franjas recomendadas por las especificaciones del INVIAS y se puede considerar útil para ajustar la composición granulométrica del ARC.

7.3- Equivalente de arena ARC

En la tabla 5, se muestran los resultados correspondientes al ensayo equivalente de arena realizado al ARC

Tabla 3- Equivalente de arena

Equivalente de arena				
Probeta	Lectura arcilla	Lectura arena	Equivalente (%)	Promedio (%)
1	10	2.4	24	24
2	9.5	2.2	24	
3	10	2.3	23	

Fuente: elaboración propia.

El resultado del ensayo de equivalente de arena no cumple con el porcentaje mínimo permitido por los requisitos de las especificaciones de los artículos 320 y 330 del INVIAS para agregados de base y sub-base granulares. El valor de equivalente de arena bajo puede deberse a que el material de ARC presenta cierto contenido de cemento, el cual puede afectar el valor de la lectura de arcilla. En consecuencia, si se espera que el material trabaje con el contenido de cemento presente en éste, se debe reconsiderar el resultado.

7.4- Equivalente de arena material de aporte

La tabla 6 presenta los resultados obtenidos para el ensayo de equivalente de arena al cual se sometió el agregado de aporte

Tabla 4- Equivalente de arena

Equivalente de arena				
Probeta	Lectura arcilla	Lectura arena	Equivalente (%)	Promedio (%)
1	8.5	2.8	33	36
2	9.8	3.7	38	

Fuente: elaboración propia.

El resultado del ensayo de equivalente de arena se encuentra dentro del mínimo permitido por la especificación para base y sub-base.

7.5- Desgaste en Máquina de los Ángeles ARC

Al someter el material ARC al ensayo de abrasión en la máquina de los ángeles, se obtuvieron los resultados que se resumen en la tabla 7.

Tabla 5- Porcentaje de pérdidas en Máquina de los Ángeles

Revoluciones	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Perdidas (%)
100	5000	4545	9
500	4545	2895	36

Fuente: elaboración propia.

Se evidencia que el resultado a la degradación del material cumple con el máximo permitido para sub-base de cualquiera de las tres clases de sub-base. Por otra parte, para base no cumple con el máximo permitido a 100 revoluciones, pero sí con el máximo a 500 revoluciones para base clase C y B.

7.6- Desgaste en Máquina de los Ángeles material de aporte

En la tabla 8 se resumen los resultados del ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles para el agregado de aporte.

Tabla 6- Porcentaje de pérdidas en Máquina de los Ángeles

Revoluciones	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Perdidas (%)
100	5017	4625	8
500	4625	3140	32

Fuente: elaboración propia.

El resultado de desgaste en Máquina de los Ángeles del agregado de aporte cumple con el requerimiento máximo para cualquier tipo de base o sub-base.

7.7- Angularidad de la fracción fina ARC

La tabla 9 que se presenta a continuación, contiene los resultados de angularidad de la fracción fina del ARC.

Tabla 7- Angularidad fracción fina ARC

v (ml)	f (g)	g	U	Usuelto
99.55	140.1	2.56	45.00%	45.00%
99.55	140.8	2.56	44.80%	
99.55	139.8	2.56	45.10%	

Fuente: elaboración propia.

Nota: se utilizó el método A de la norma del INVIAS 239-13.

Se observó que el porcentaje de angularidad del agregado fino presenta un resultado mayor al indicado por las especificaciones de base granular INV, artículo 330-13.

7.8- Angularidad de la fracción fina material de aporte

A continuación, se encuentra la tabla 10 con los resultados de angularidad de la fracción fina del material de aporte.

Tabla 8- Angularidad fracción fina ARC

v (ml)	f (g)	g	U	Usuelto
99.55	143.2	2.53	43.10%	43.30%
99.55	142.8	2.53	43.30%	
99.55	142.6	2.53	43.40%	

Fuente: elaboración propia.

El resultado obtenido del ensayo de angularidad está dentro del mínimo permitido por la especificación para base.

7.9- Gravedad específica ARC

La tabla 11 contiene los resultados que se recopilaron al realizar el ensayo de gravedad específica de la fracción gruesa para el ARC

Tabla 9- Gravedad específica de fracción gruesa

Probeta	GSH	GSS	GAP	Densidad sh (kg/m ³)	Densidad sss (kg/m ³)	Densidad ap (kg/m ³)	ABS (%)
1	2.69	2.77	2.93	2681.93	2762.69	2918.19	3.01
2	2.73	2.81	2.97	2722.1	2801.57	2957.74	2.92
Promedio	2.709	2.789	2.945	2702.015	2782.129	2937.963	2.965

Fuente: elaboración propia

En la densidad del material de aporte se obtuvo un resultado común para un agregado estándar.

En la tabla 12, se pueden visualizar los resultados de gravedad específica para la fracción fina del ARC.

Tabla 10- Gravedad específica de fracción fina

Probeta	GSH	GSS	GAP	Densidad sh (kg/m ³)	Densidad sss (kg/m ³)	Densidad ap (kg/m ³)	ABS (%)
1	2.55	2.65	2.81	2547	2640	2807	3.6
2	2.56	2.65	2.82	2553	2643	2809	3.6
Promedio	2.56	2.65	2.82	2550	2642	2808	3.6

Fuente: elaboración propia.

El resultado de gravedad específica evidencia que el material posee una buena densidad y resistencia.

7.10- Gravedad específica material de aporte

A continuación, se presentan los resultados para el ensayo de gravedad específica del material de aporte, contenidos en la tabla 13.

Tabla 11- Gravedad específica de fracción gruesa

Muestra	G SH	G SSS	G AP	Densidad sh (Kg/cm3)	ABS (%)
1	2.671	2.743	2.88	2664.52	2.704
2	2.656	2.733	2.88	2649.31	2.911
Promedio	2.6635	2.738	2.88	2656.92	2.807

Fuente: elaboración propia.

La tabla 14 muestra los resultados de gravedad específica de la fracción fina del material de aporte

Tabla 12- Gravedad específica de fracción fina

Muestra	G SH	G SSS	G AP	Densidad sh (kg/m3)	Densidad sss (kg/m3)	Densidad ap (Kg/m3)	ABS (%)
1	2.56	2.7	2.98	2557	2696	2972	5.5
2	2.49	2.66	3	2484	2653	2991	6.8
	2.53	2.68	2.99	2520	2674	2982	6.1

Fuente: elaboración propia.

El resultado de densidad del material de aporte dio un resultado común para un agregado estándar.

7.11- Límites de Atterberg ARC

Al realizar los ensayos para definir los límites de Atterberg, se obtuvieron los valores contenidos en la tabla 15.

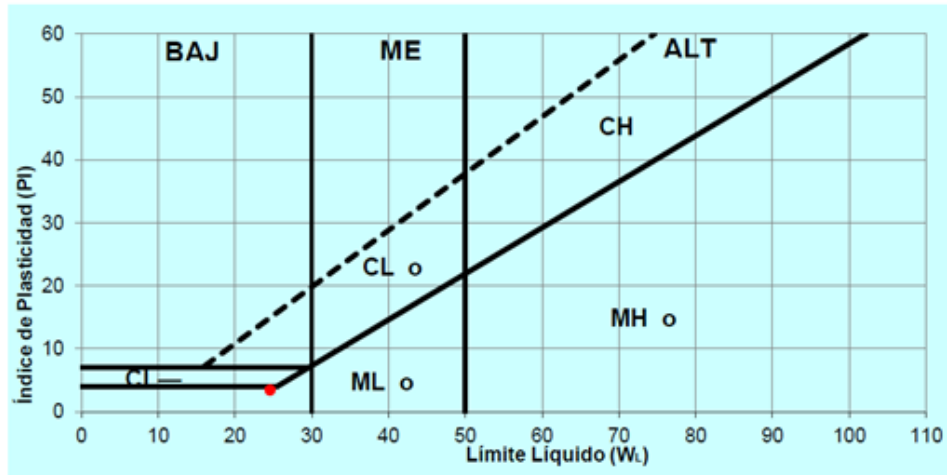
Tabla 13- Límites de Atterberg

Límite líquido (%)	24.5
Límite plástico (%)	21
Índice plástico (%)	3.5

Fuente: elaboración propia.

Se utilizó la carta de Casagrande para hacer la respectiva clasificación del material, tal y como se muestra en la gráfica 8.

Gráfica 8- Carta de Casa Grande



Fuente: elaboración propia.

La Carta de Casagrande ofrece información que clasifica el material como un limo no plástico, indicando que los finos presentes en el material no representan un peligro.

El material pasante del tamiz 40 usado por recomendación de la norma no presenta límite plástico, ya que no se deja manipular con facilidad a bajas humedades desintegrándose al momento de formar los rollos de 33 mm de espesor.

Al igual que con el ensayo de límite líquido, ésta es muy susceptible a la humedad comportándose más como un mortero de concreto, dificultando su manipulación en el equipo de Casagrande.

7.12- Límites de Atterberg material de aporte

El ensayo de límites de Atterberg dio como resultado un material no plástico, es decir, que éste no posee limos ni arcillas.

7.13- Índice de aplanamiento y alargamiento ARC

Los valores obtenidos en el ensayo de índice de aplanamiento del ARC se resumen en la tabla 16.

Tabla 14- Índice de aplanamiento

Masa total de la muestra (g)			11408		
Tamiz (mm)	Masa de la fracción (g)	Masa retenida (g)	Masa pasa (g)	Índice de cada fracción (%)	índice global
1 1/2"	1241	1066	175	86	16
1"	2358	1917	441	81	
3/4"	1404	1223	181	87	
1/2"	2996	2416	580	81	
3/8"	1929	1630	299	84	
1/4"	1480	1304	176	88	
Total	11408	9556	1852		

Fuente: elaboración propia.

Para el material ARC se obtuvieron los valores de índice de alargamiento que se resumen en la tabla 17

Tabla 15- Índice de alargamiento

Masa total de la muestra (g)			11408		
Tamiz (mm)	Masa de la fracción (g)	Masa retenida (g)	Masa pasa (g)	Índice de cada fracción (%)	índice global
1 1/2"	1241	222	1019	18	22
1"	2358	666	1692	28	
3/4"	1404	348	1056	25	
1/2"	2996	523	2473	17	
3/8"	1929	422	1507	22	
1/4"	1480	348	1132	24	
Total	11408	2529	8879		

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los índices de alargamiento y de aplanamiento, se evidencia que cumple con el requerimiento máximo para una base granular según INV, artículo 330.

7.14- Índice de aplanamiento y alargamiento material de aporte

El índice de aplanamiento obtenido para el material de aporte se visualiza en la tabla 18.

Tabla 16- Índice de aplanamiento

Masa total de la muestra (g)			6700		
Tamiz (mm)	Masa de la fracción (g)	Masa retenida (g)	Masa pasa (g)	Índice de cada fracción (%)	Índice global
1 1/2"	0	0	0	0	8
1"	0	0	0	0	
3/4"	742	742	0	100	
1/2"	1043	883	160	85	
3/8"	843	791	52	94	
1/4"	808	762	46	94	
Total	3436	3178	258		

Fuente: elaboración propia.

El valor correspondiente al índice de alargamiento para material de aporte, se puede visualizar en la tabla 19.

Tabla 17- Índice de alargamiento

Masa total de la muestra (g)			6700		
Tamiz (mm)	Masa de la fracción (g)	Masa retenida (g)	Masa pasa (g)	Índice de cada fracción (%)	Índice global
1 1/2"	0	0	0	0	41
1"	0	0	0	0	
3/4"	742	110	632	15	
1/2"	1043	707	336	68	
3/8"	843	306	537	36	
1/4"	808	281	527	35	
Total	3436	1404	2032		

Fuente: elaboración propia.

Al revisar los resultados, se concluye que, el índice de aplanamiento se encuentra dentro del máximo valor permitido, pero el índice de alargamiento sobrepasa el valor máximo.

7.15- Ensayo de 10% de finos ARC

A continuación, se muestra en la tabla 20 los resultados del ensayo de 10% de finos para el ARC

Tabla 18- 10% de finos

Ensayo	1	2
Condición de ensayo	Seco	Seco
Masa del agregado (g)	2798	2851
Carga (KN)	157.8	158.3
Masa retenida en tamiz N° 8	2495	2506
Finos (%)	10.8	12
Carga necesaria para producir 10% de finos (KN)	149	139
Promedio carga (KN)	140	

Fuente: elaboración propia.

Para el ensayo de 10% de finos cumple con la carga mínima requerida según INVIAS, artículo 330.

7.16- Ensayo de 10% de finos material de aporte

En la tabla 21 se registran los valores obtenidos en el ensayo de 10% de finos del material de aporte.

Tabla 19- 10% de finos

Condición de ensayos realizados	Seco
Carga promedio necesaria para producir 10% de finos (KN)	138

Fuente: elaboración propia.

El resultado del ensayo de 10% de finos es aceptable, ya que el valor mínimo permitido por la especificación se encuentra muy por debajo del obtenido.

7.17- Ensayo de caras fracturadas ARC

El valor del ensayo de caras fracturadas es permitido para cualquier tipo de base según el artículo 330 del INVIAS, pues el valor obtenido es 100% de caras fracturadas.

7.18- Ensayo de caras fracturadas material de aporte

El valor del ensayo de caras fracturadas es permitido para cualquier tipo de base según el artículo 330 del INVIAS, pues el valor obtenido es 100% caras fracturadas.

7.19- Ensayo Micro-Deval ARC

Al hacer el ensayo Micro-Deval para el ARC, se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 22.

Tabla 20- Micro-Deval

Gradación usada (Tabla 1, 2 o 3)	Pasa 3/4" Retiene 3/8"
Ensayo No.	1
Masa de esferas (g)	5000
Tiempo de ensayo (min)	120
Masa muestra seca antes del ensayo, A (g)	1500.3
Masa muestra seca lavada sobre el tamiz No. 16, B (g)	918.1
Pérdida (g)	582.2
Porcentaje de pérdida (%)	38.8

Fuente: elaboración propia.

Al comparar el resultado del ensayo Micro-Deval obtenido para el material de ARC con las especificaciones de INVIAS para base y sub-base, éste indica que no cumple con el requerimiento máximo permitido. Por tanto, se recomienda reducir el porcentaje de material de ARC agregando un material de aporte que ofrezca mejores resultados de Micro-Deval para que la dosificación cumpla tal característica.

7.20- Ensayo Micro-Deval material de aporte

En el ensayo Micro-Deval para el material de aporte se obtuvieron los valores que se pueden visualizar en la tabla 23.

Tabla 21- Micro-Deval

Gradación usada (Tabla 1, 2 ó 3)	Pasa 3/4" Retiene 3/8"
Ensayo No.	1
Masa de esferas (g)	5000
Tiempo de ensayo (min)	120
Masa muestra seca antes del ensayo, A (g)	1500.7
Masa muestra seca lavada sobre el tamiz No. 16, B (g)	732.7
Pérdida (g)	768
Porcentaje de pérdida (%)	51.2

Fuente: elaboración propia.

El resultado del ensayo de Micro-Deval se encuentra por fuera de los valores máximos permitidos por las especificaciones para base y sub-base.

7.21- Contenido de arcilla y partículas deleznales ARC

No se encontró materia orgánica en el material de ARC.

7.22- Contenido de arcilla y partículas deleznales material de aporte

No se encontró materia orgánica en el material de aporte.

7.23- Azul de Metileno ARC

El valor de azul de metileno cumple con el requerimiento máximo para base al analizar los resultados que se resumen en la tabla 24.

Tabla 22- Azul de metileno

Masa de la muestra (g)	209.8
Volumen total añadido (ml)	50
Valor de azul (ml/g)	2.4

Fuente: elaboración propia.

7.24- Azul de metileno material de aporte

El resultado de azul de metileno se encuentra dentro del rango permitido con la norma según los valores obtenidos, que se presentan en la tabla 25.

Tabla 23- Azul de metileno

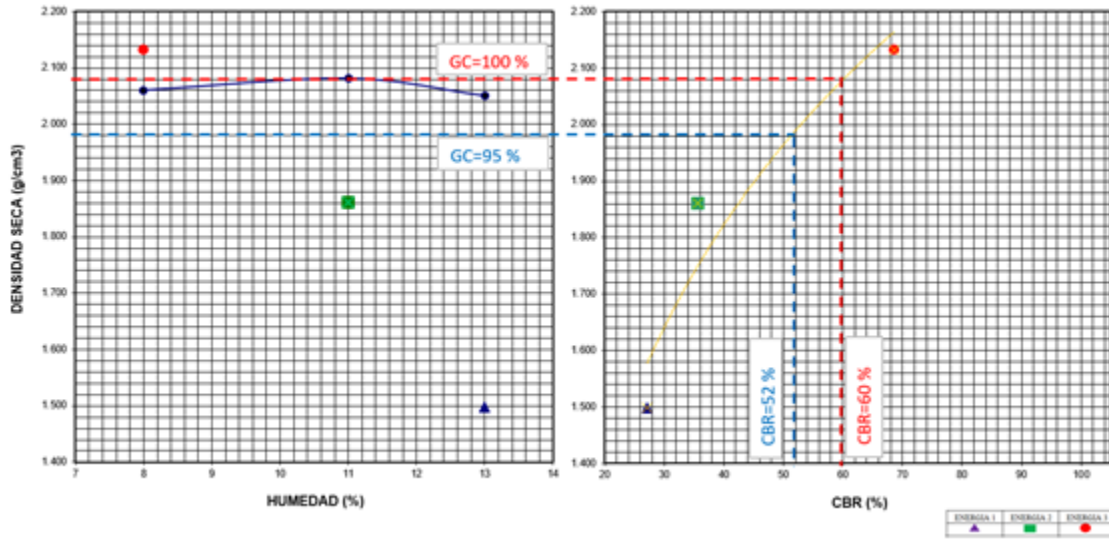
Masa de la muestra (g)	206.3
Volumen total añadido (ml)	55
Valor de azul (ml/g)	2.67

Fuente: elaboración propia.

7.25- CBR ARC

En la gráfica 9, se puede visualizar los valores de CBR obtenidos para el ARC

Gráfica 9- CBR ARC



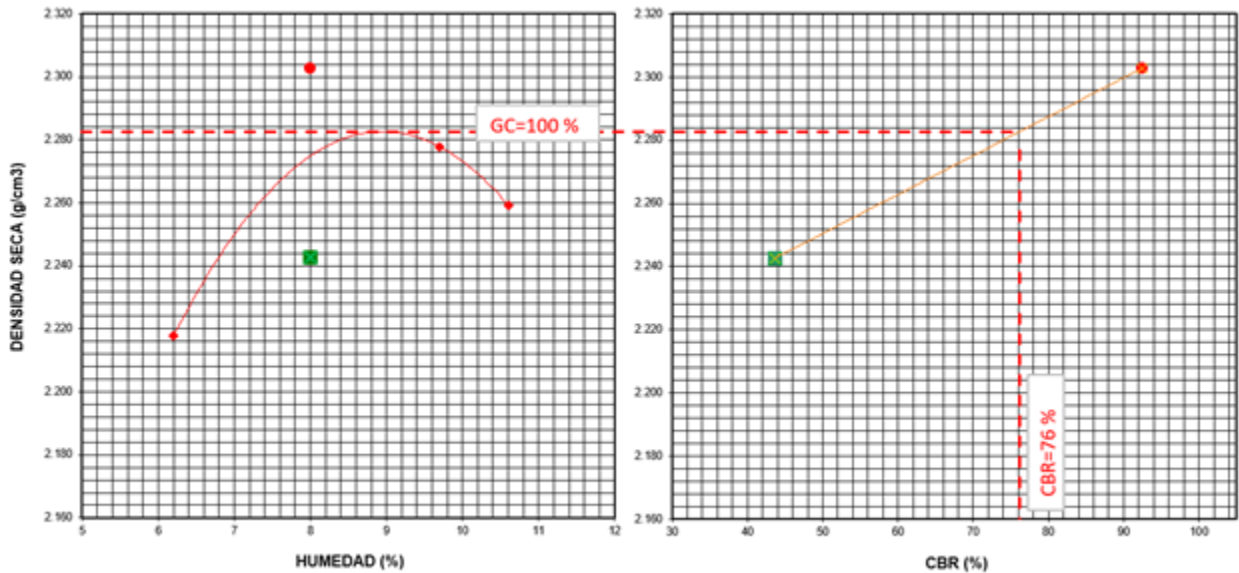
Fuente: elaboración propia.

El ARC alcanzó valores de CBR del 60%, valor que podría servir para una SBG, pero no para una BG, donde los valores exigidos por la norma INVIAS son un CBR mayor a 30% en SBG y mayor al 70% para BG.

7.26- CBR Material de aporte

En la gráfica 10, se puede visualizar los valores de CBR obtenidos para el material de aporte

Gráfica 10- CBR material de aporte

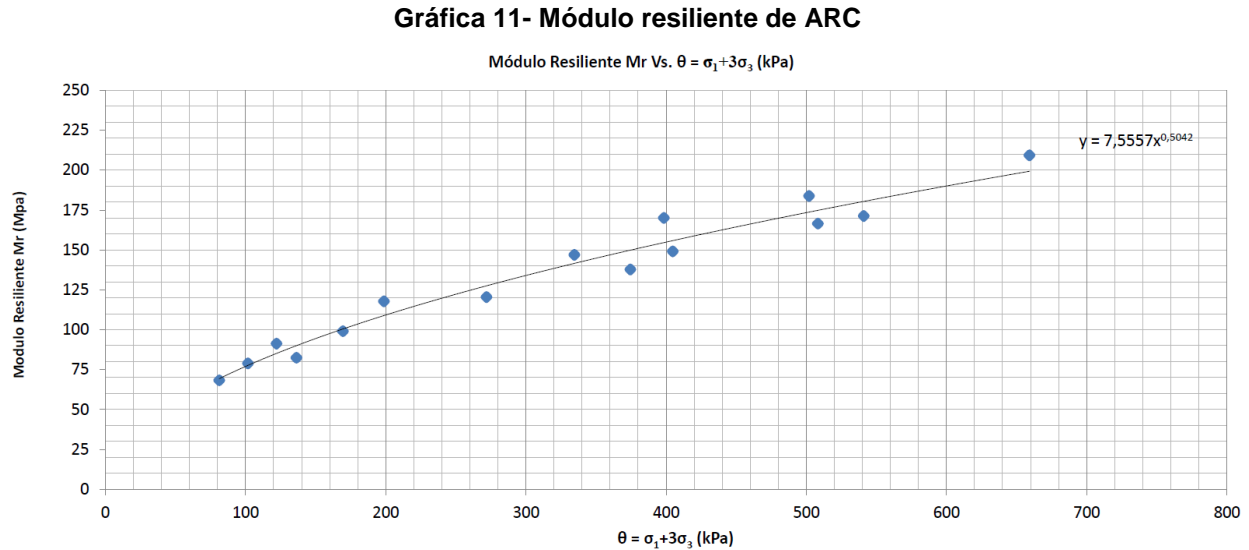


Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los resultados de CBR para este material, se puede concluir que es apto como base y subbase granular según los parámetros exigidos por este ensayo.

7.27- Módulo resiliente ARC

En la gráfica 11, se puede visualizar el comportamiento del material ARC al ser sometido al ensayo de módulo resiliente.



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica, se puede apreciar que el material alcanza un esfuerzo de hasta 209.29 MPa. Al comparar estos resultados con la norma INV-E 156, que hace referencia a la norma AASHTO, se clasifica al material dentro del grupo A2. Esta clasificación indica que el material es de grano grueso y es adecuado para su uso en bases y subbases de pavimentos.

7.28- Módulo resiliente material de aporte

Aunque se realizó el ensayo del módulo resiliente para el agregado de aporte, no se pudieron obtener resultados, puesto que, la muestra falló en el primer ciclo, lo que imposibilitó continuar con el proceso; después de intentar acondicionar y compactarla de nuevo, se observó el mismo fenómeno, lo que confirmó que la ejecución de esta práctica no se podía llevar a cabo en este tipo de material. La muestra falla por deformación ya que alcanza el 5% de la altura en el primer ciclo; el tipo de falla es desmoronamiento.

7.29-Cálculo de dosificación de ARC y material de aporte para base y subbase granular

Para corregir las deficiencias identificadas en los ensayos realizados hasta este punto y ajustar las características de los materiales, es necesario calcular la dosificación adecuada entre el ARC y el material de aporte para lograr un comportamiento óptimo en la subbase granular y la base granular. Tras analizar en qué ensayos el ARC presentaba deficiencias, se identificaron el ensayo de micro-deval, el ensayo de equivalente de arena y el índice de aplanamiento y alargamiento, es así como se determina que la implementación de una base y subbase granular de tipo C sería la más adecuada para estos materiales.

En este caso particular, para lograr una mezcla efectiva en la subbase granular, se recomienda utilizar un 80% de ARC y un 20% de agregado de aporte. En cambio, para la base granular, las proporciones recomendadas son un 35% de ARC y un 65% de agregado de aporte.

Estas proporciones garantizarán la obtención de mezclas que cumplan con los requisitos granulométricos y las características deseadas para cada capa de la estructura vial. De esta manera, se podrá mejorar la calidad y el rendimiento de los materiales, asegurando un mejor desempeño en la construcción de la subbase y la base granular.

7.30- CBR de combinación de ARC con material de aporte como base, a los 1, 7, 14 y 28 días de curado

La tabla 26 presenta los resultados de CBR, para la combinación de ARC y material de aporte, después de ser dosificados para su funcionamiento como una base granular

Tabla 24- Resultados de CBR de combinación de ARC con material de aporte como base

%CBR	Penetración (pg)	Días de curado	BASE GRANULAR
	0.1	1	23
0.2	32		
0.1	7	24	
0.2		40	
0.1	14	26	
0.2		49	
0.1	28	31	
0.2		56	

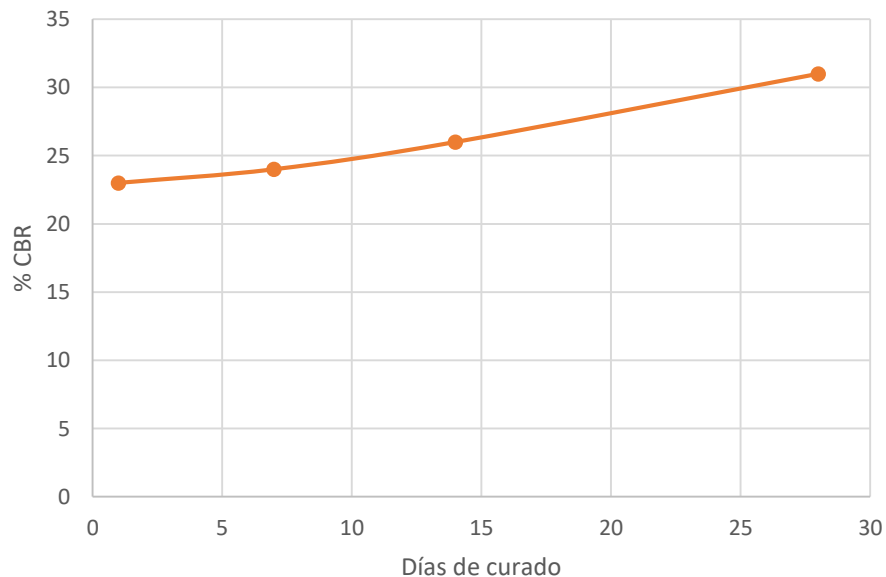
Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó previamente, este ensayo de CBR que incluye el material ARC es considerado poco convencional, ya que normalmente se realiza con materiales naturales, utilizando una muestra patrón que también es de origen natural. Sin embargo, en este caso se buscó determinar el aumento de resistencia a medida que transcurre el tiempo de curado, lo cual indicaría la activación del cemento presente en el ARC.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este ensayo, se puede evidenciar lo mencionado anteriormente. El material inicialmente mostró un CBR del 23% en el primer día, pero aumentó a un 31% en el día 28, lo que representa un incremento del 35% en la resistencia a la penetración. Este resultado es de gran importancia, ya que confirma la hipótesis de que el material cementicio presente en el ARC se reactiva y genera un aumento significativo en la resistencia.

En la gráfica 12 se puede visualizar con mayor detalle este comportamiento, donde el porcentaje de CBR es directamente proporcional al paso del tiempo de curado.

Gráfica 12- CBR para BG vs días de curado.



Fuente: elaboración propia.

7.31- CBR de combinación de ARC con material de aporte como sub-base, a los 1, 7, 14 y 28 días de curado.

La tabla 27 presenta los resultados de CBR, para la combinación de ARC y material de aporte, después de ser dosificados para su funcionamiento como una subbase granular

Tabla 25- Resultados de CBR de combinación de ARC con material de aporte como subbase

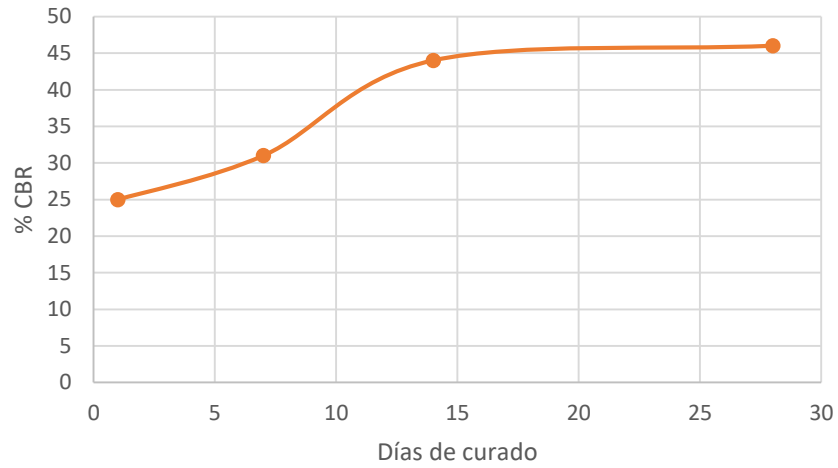
%CBR	Penetración (pg)	Días de curado	SUB-BASE GRANULAR
	0.1	1	25
0.2	48		
0.1	7	31	
0.2		56	
0.1	14	44	
0.2		78	
0.1	28	46	
0.2		82	

Fuente: elaboración propia.

Al igual que el ensayo de CBR de combinación de ARC con material de aporte como base, a los 1, 7, 14 y 28 días de curado, en este caso, usando la combinación para subbase, se logró evidenciar la creciente resistencia a la compresión al transcurrir los días de curado; en el día 1 se puede apreciar un CBR de un valor del 25% y al día 28, un CBR del 46%, indicando un crecimiento de la resistencia a la penetración debido al curado de un 81.6%.

En la gráfica 13 se puede visualizar con mayor detalle este comportamiento, donde el porcentaje de CBR es directamente proporcional al paso del tiempo de curado.

Gráfica 13- CBR para SBG vs días de curado.



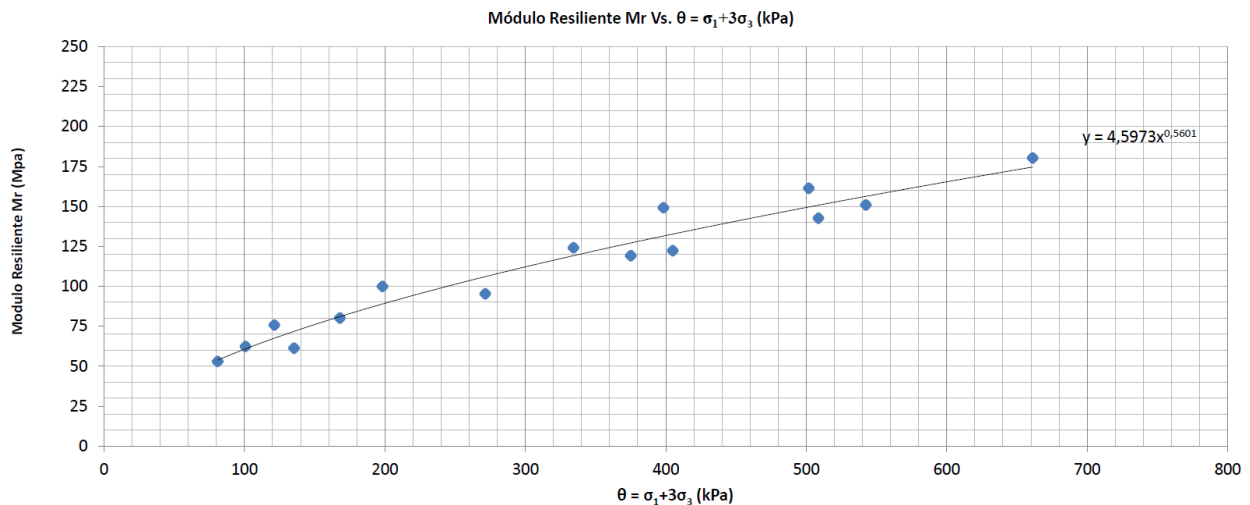
Fuente: elaboración propia.

Posiblemente el aumento del CBR de la sub-base comparado con la base (que no era esperado) puede ocurrir por el incremento en el material fino de ARC que genera mayores reacciones de hidratación.

7.32- Módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como base

En la gráfica 14, se puede encontrar el comportamiento del material ARC con el material de aporte al ser sometidos al ensayo de módulo resiliente como una base granular.

Gráfica 14- Módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como base



Fuente: elaboración propia.

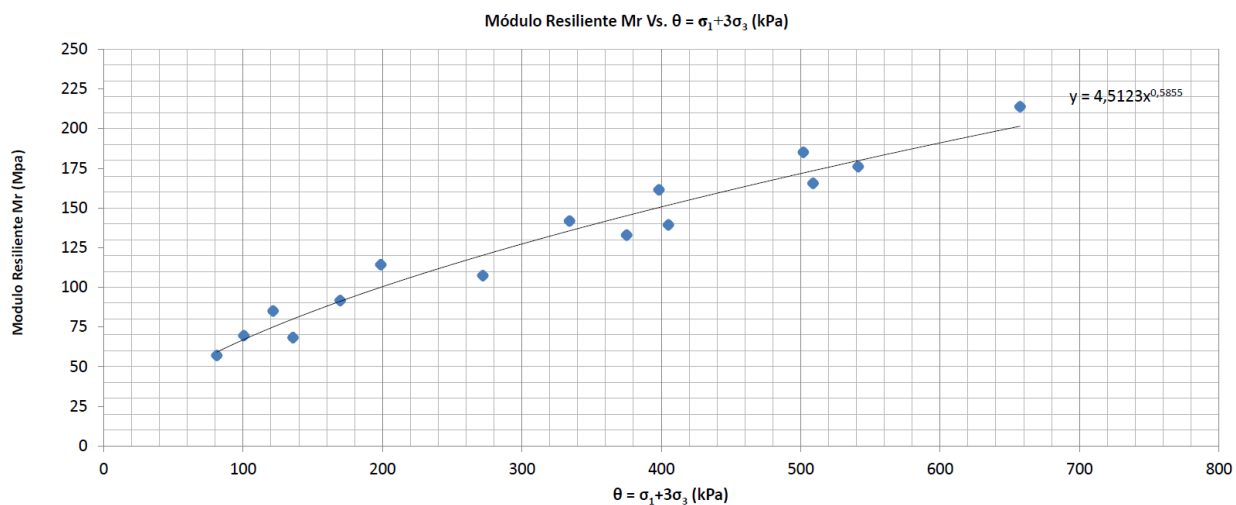
En la gráfica, se puede apreciar que el material alcanza un esfuerzo máximo de hasta 180.31 MPa. Al comparar estos resultados con los criterios establecidos en la norma INV-E 156, que está basada en la norma AASHTO, se clasifica al material dentro del grupo A2. Esta clasificación indica que el material tiene una granulometría gruesa y es adecuado para su uso en las capas de base y subbase de pavimentos.

Es importante destacar que, dado que el ensayo se realizó considerando la composición del material como base, se puede concluir que el material presenta un comportamiento adecuado frente a las cargas de resiliencia y es altamente resistente en este tipo de condiciones.

7.33- Módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como sub-base

En la gráfica 15, se puede encontrar el comportamiento del material ARC con el material de aporte al ser sometido al ensayo de módulo resiliente como una subbase granular.

Gráfica 15- Módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como sub-base



La gráfica 13 revela que el material exhibe una resistencia máxima de hasta 213.8 MPa. Al contrastar estos resultados con los criterios establecidos en la norma INV-E 156, que se basa en la norma AASHTO, se clasifica el material en el grupo A2. Esta clasificación específica señala que el material tiene una granulometría gruesa y es idóneo para su implementación en las capas de base y subbase de pavimentos.

Es digno de destacar que, considerando que el ensayo se llevó a cabo evaluando la composición del material como subbase, se puede concluir que el material exhibe un desempeño excepcional ante las cargas de resiliencia y presenta una resistencia destacada en este tipo de situaciones.

7.34- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como base

En la tabla 28 se presentan resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de la combinación de ARC con material de aporte en su dosificación como base granular.

Tabla 26- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como base

BASE GRANULAR						
Edad (días)	No. Molde	Lectura de carga (0,0001")	Esfuerzo (Mpa)	Deformación (0,001")	Deformación (mm)	Humedad (%)
1	25 (CBR)	50	0.0895	120	3.048	7.9
7	8	85	0.1951	0.6	4.064	7.9
14	4 (CBR)	157	0.2811	200	5.080	7.6
14	6	115	0.2059	180	4.572	7.9
14	16	94	0.1683	155	3.937	7.1
28	28 (CBR)	147	0.2632	240	6.096	8.0
28	3	138	0.2471	255	6.477	7.9
28	25	142	0.2542	230	5.842	8.0

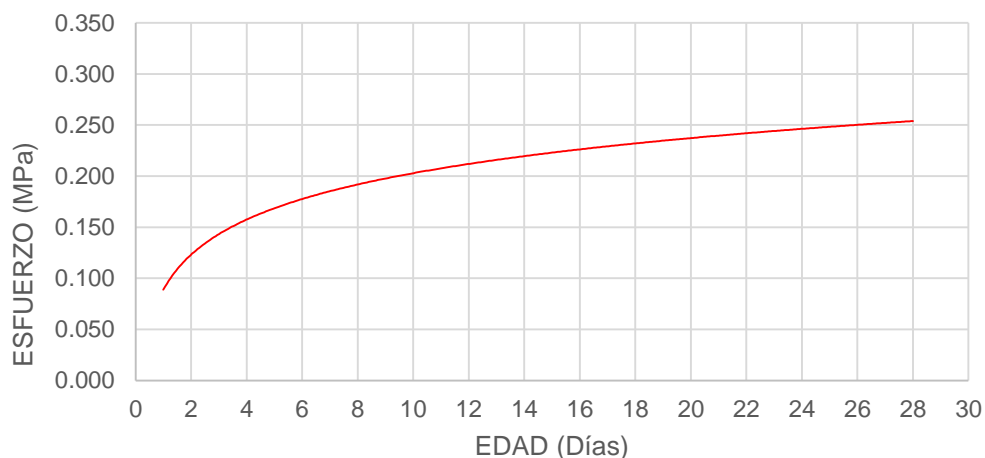
Fuente: elaboración propia.

Este ensayo realizado de forma empírica ha servido para demostrar el excelente comportamiento del material frente a cargas axiales cuando se somete a un proceso de curado de hasta 28 días. Los resultados obtenidos han evidenciado que el cemento presente en el material se activa y contribuye significativamente a su resistencia. Se observa un esfuerzo de 0.0895 MPa en el primer día, el cual se incrementa a 0.2632 MPa en el día 28, representando un aumento de resistencia del 194%.

Estos hallazgos confirman el efecto positivo del curado en la resistencia del material, demostrando su capacidad para soportar cargas axiales de manera eficiente.

La gráfica 16 representa el comportamiento directamente proporcional que tiene el esfuerzo de acuerdo al transcurrir los días de inmersión.

Gráfica 16- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de curado para combinación de ARC con material de aporte como base



Fuente: elaboración propia.

7.35- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como sub-base

En la tabla 28 se presentan resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de la combinación de ARC con material de aporte en su dosificación como base granular.

Tabla 27- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como sub-base

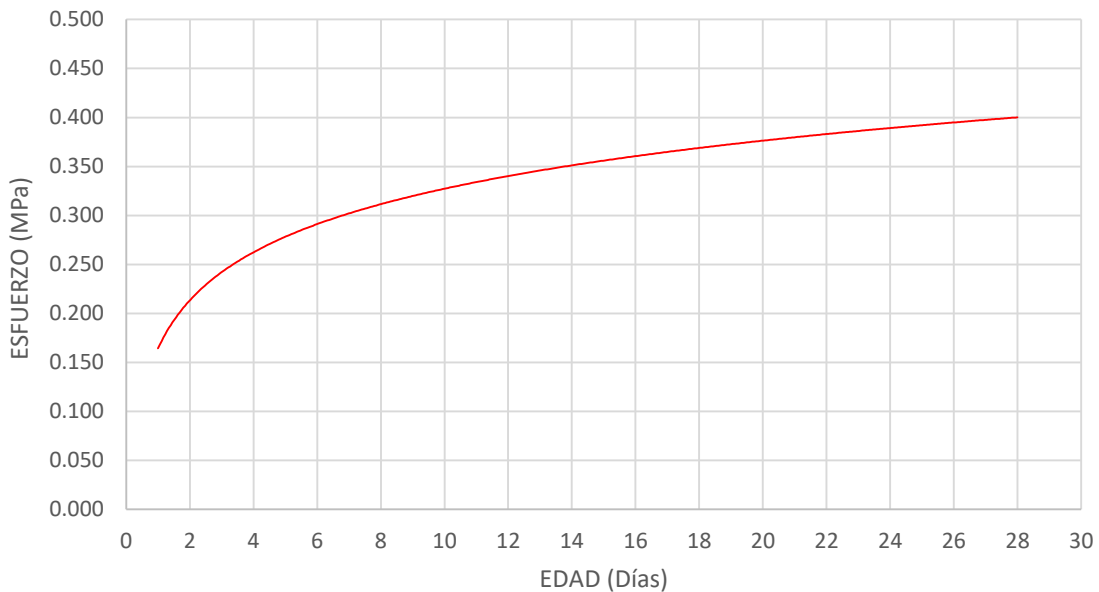
SUBBASE GRANULAR						
Edad (días)	No. Molde	Lectura de carga (0,0001")	Esfuerzo (Mpa)	Deformación (0,001")	Deformación (mm)	Humedad (%)
1	34 (CBR)	65	0.1164	260	6.604	8.9
7	23 (CBR)	182	0.3258	220	5.588	10.6
7	24	181	0.3240	175	4.445	10.2
7	22	182	0.3258	195	4.953	10.3
14	21	185	0.3312	200	5.080	10.1
14	30	215	0.3849	190	4.826	9.5
14	39 (CBR)	267	0.4297	210	5.334	10.8
28	42	165	0.2954	190	4.826	9.5
28	15 (CBR)	202	0.3616	250	6.350	10.0
28	37	240	0.4297	230	5.842	8.2

Fuente: elaboración propia.

La inclusión de material cementante en el material evaluado ha demostrado ser altamente beneficiosa, ya que ha incrementado significativamente su resistencia a la compresión en un 270% para la sub-base granular (SBG). Se puede observar que en el día 1, el material presentó un esfuerzo de 0.1164 MPa, el cual aumentó hasta alcanzar un valor de 0.4297 MPa en el día 28. Estos resultados resaltan una vez más la notable influencia del cemento en el comportamiento del material, fortaleciendo su capacidad para resistir cargas de compresión.

La gráfica 17 representa el comportamiento directamente proporcional que tiene el esfuerzo de acuerdo al transcurrir los días de inmersión.

Gráfica 17- Resistencia a la compresión a los 1, 7, 14 y 28 días de combinación de ARC con material de aporte como sub-base



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta una tabla que resume los resultados de los ensayos realizados tanto para el material ARC como para el material de aporte. Además, se incluye la especificación técnica del INVIAS, que es la misma norma a la cual se refiere el IDU y que actualmente es la normativa vigente en Colombia para la evaluación de agregados reciclados. Estas normas son considerada importantes en el análisis, ya que la comparación permite evaluar la conformidad del material evaluado con los estándares establecidos en ellas.

Tabla 28- Resultados de ensayos

ENSAYO		NORMA DE ENSAYO INV / IDU	MATERIAL DE RCD	AGREGADO DE APORTE
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (Gradación A) (%)	500 Revoluciones	E-218	36	32
	100 Revoluciones		9	8
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval (%)		E-238	38.8	51.2
Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos (KN)		E-224	140	138
Límite líquido (%)		E-125	24.5	NP
Índice de plasticidad (%)		E-125 y E-126	3.5	NP
Equivalente de arena (%)		E-133	24	36
Valor de azul de metileno		E-235	2.4	2.7
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales (%)		E-211	0	0
Índice de alargamiento y aplanamiento (%)	Índice de alargamiento	E-230	22	41
	Índice de aplanamiento		16	8
Caras fracturadas (%)	Una cara	E-227	100	100
	Dos caras			
Angularidad de la fracción fina (%)		E-239	45.0	43.3
Gravedad específica seca al horno	Fracción gruesa	E- 222 y E-223	2.71	2.66
	Fracción fina		2.56	2.53
Absorción (%)	Fracción gruesa		3.0	2.8
	Fracción fina		3.6	6.1
CBR (%)		E-148	60	76

Fuente: elaboración propia.

Tabla 29- Resultados de ensayos

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV / IDU	MATERIAL DE RCD	AGREGADO DE APORTE	SUB-BASE GRANULAR	BASE GRANULAR
Módulo Resiliente (Mpa)	E-156	209.29	-	213.8	180.31
CBR en los días 1, 7, 14 y 28 después del curado	E-148	Penetración (pg)	Días de curado	SUB-BASE GRANULAR	BASE GRANULAR
		0.1	1	25	23
		0.2		48	32
		0.1	7	31	24
		0.2		56	40
		0.1	14	44	26
		0.2		78	49
		0.1	28	46	31
		0.2		82	56
		Resistencia a la compresión (Mpa)	E-632	Días de curado	SUB-BASE GRANULAR
	ESFUERZO				
1	0.1164			0.0895	
7	0.3258			-	
14	0.4296			0.2811	
28	0.4297			0.2632	

Fuente: elaboración propia.

8- Conclusiones

A partir de los resultados de cada uno de los ensayos y del análisis de la información recopilada durante la investigación, se pueden extraer algunas conclusiones. Esto, teniendo en consideración el problema y los objetivos planteados inicialmente.

En primer lugar, la investigación revela que el material ARC proveniente de la ciudad de Cali es apto para su uso como base tipo C y sub-base tipo C para pavimentos, siempre y cuando se evalúen sus propiedades para determinar si es apto para su uso en este tipo de granulometrías y, en caso de no serlo, es posible mejorar sus propiedades con un agregado de aporte y así cumplir los requisitos consignados en las respectivas normas, lo cual es consistente con el objetivo principal de la investigación. En consecuencia, estos materiales pueden ser utilizados con confianza siempre que se sometan a un proceso adecuado de preparación y caracterización, constituyéndose en un material innovador en el país y, a su vez, representando una reducción en los costos de producción de materiales en el campo de la pavimentación.

De igual manera, la utilización de RCD en obras viales es altamente recomendable, ya que los resultados indican su viabilidad. Esto se traduce en una disminución de la cantidad de residuos que terminan en los vertederos y demás sitios inadecuados, al tiempo que permite una reducción del impacto ambiental, lo cual es uno de los principales objetivos del estudio, pues las proporciones obtenidas demuestran que se reduce el uso de subbase granular natural en un 80% y de base granular natural en un 35%, porcentajes que son reemplazados por RCD transformado en ARC.

Debido a las proporciones de combinación de RCD con material de aporte, se puede notar que al realizar una sub-base granular el porcentaje necesario del primer material es mayor al 75%, lo que significa una gran reducción en los costos de construcción y explotación de materiales y, por tanto, expone su 70 importancia en la pavimentación

La presencia de material cementante en el material evaluado resultó beneficiosa, ya que aumentó su resistencia, lo cual se evidencia en los resultados de CBR, y resistencia a la compresión después de hasta 28 días de curado. Dichos resultados demuestran que, aunque el cemento haya sido activado previamente, al involucrarlo en este tipo de aplicaciones sus componentes pueden volver a activarse. Tal característica

es un punto de partida importante para la reutilización de materiales en la construcción y el fomento de prácticas sostenibles.

El uso de ARC en la sociedad puede aportar una serie de beneficios significativos, como es el fomento de la economía local al generar empleos y oportunidades laborales que abarcan desde la gestión de residuos hasta la producción de materiales reciclados para su uso en pavimentos. Además, el procesamiento adecuado de tales residuos puede mejorar la calidad de vida de la comunidad al evitar su disposición en lugares que afecten el disfrute de un ambiente ameno.

Por otro lado, el uso de AR permitiría la construcción de vías a bajo costo, lo que facilitaría la conexión entre distintas zonas y mejoraría la movilidad urbana. Esto se traduciría en un beneficio importante para la sociedad, especialmente en aquellas áreas con recursos limitados.

Finalmente, es importante destacar que en la actualidad el INVIAS no tiene regulaciones específicas para la gestión de RCD como material de pavimentación, aunque se ha demostrado que estos materiales cumplen con los requisitos para su uso en construcciones viales y pueden ser beneficiosos en términos de reducción de costos y sostenibilidad ambiental a nivel nacional. Sin embargo, el IDU ha incluido el uso de RCD en sus normativas, aunque estas normativas no se han definido como requisitos obligatorios para materiales de construcción de carreteras, y deben ser consideradas en este tipo de aplicaciones. A su vez, es necesario fomentar estudios rigurosos para evaluar la viabilidad y seguridad de utilizar los RCD en la construcción de carreteras y vías con el fin de promover su uso más frecuente y efectivo.

9- Recomendaciones para trabajos futuros

Con base en el análisis realizado, es posible plantear algunas recomendaciones para estudios futuros, ya sea en el ámbito nacional o internacional. En primer lugar, se sugiere desarrollar una investigación de las fuentes y rangos de distribución de los RCD en Colombia, ya que, aunque su reutilización en pavimentos puede reducir costos de construcción, es necesario considerar el impacto del transporte en áreas donde no se generan dichos residuos.

A su vez, en la reciclabilidad de los RCD se recomienda estudiar el impacto de la utilización de aditivos y materiales de refuerzo, tales como vidrios, ya que esto podría ayudar a mejorar su resistencia y durabilidad, y además permitiría aprovechar la cantidad de residuos de vidrio disponibles, los cuales representan una fuente de contaminación a nivel mundial cuando no se emplean adecuadamente. También se plantea evaluar los RCD de otras regiones del país o de estructuras donde se tengan volúmenes significativos de residuos homogéneos, al tiempo que se recomienda analizar si las características de los RCD pueden cambiar de acuerdo a las edades de las estructuras de donde éstos se obtuvieron.

Bibliografía

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M. y Jiménez, J. (2012). *Construcción de tramos de carretera con áridos mixtos reciclados tratados con cemento en Málaga, España*. Science Direct. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911002369?via%3DiHub>.

Álvarez, A., Espinosa, L., Ortiz, P., Hurtado, M., Cotes, L. y López, Y. (2019). *Evaluación de la degradación por compactación de materiales granulares tipo sub-base*. Revista EIA. Disponible en: <https://doi.org/10.24050/reia.v16i31.746>.

Arm, M. (2001). *Propiedades autocementantes del hormigón triturado demolido en capas sueltas: resultados de ensayos triaxiales y ensayos de campo*. Science Direct. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00095-7](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00095-7).

Bastidas, J., Reyes, F., y Rondón, H. (2020). *Uso de áridos de hormigón reciclado en mezclas asfálticas para pavimentos: una revisión*. Science Direct. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756422000757>.

Beja, I., Motta, E. y Bernucci, L. (2020). *Aplicación de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición con cemento Portland y cal hidratada como sub-base de pavimento en Brasil*. Science Direct. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820315257>.

Carlos, J., Miranda, M., Pablo, J., & Moya, A. (2019). *Estimación del módulo resiliente para materiales granulares de Costa Rica Estimation of the resilient modulus for granular materials of Costa Rica*.

Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2018)

Comisión Europea. (2016)

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2021)

Decreto 0771 (Alcaldía de Cali, 2018)

Directrices para el Uso Beneficioso de Materiales Reciclados en Carreteras y Obras de Construcción (EPA, 2016)

Especificaciones Generales de Construcción y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

Especificaciones Técnicas Generales de Materiales del Instituto de desarrollo Urbano IDU.

Gómez, A., y Farías, M. (2012). *Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y demolición en la estructura de pavimento*. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. Disponible en: <https://bit.ly/3onReAH>.

González, R. (2021). *Análisis para la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición del Sector Vivienda en Santiago de Cali: Estudio de Caso*. Colombia : Universidad Javeriana, 2021.

Guía para la elaboración del plan de gestión de residuos de construcción y demolición - RCD en la obra. Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá (2015).

Hinostroza, C. (2020). *Evaluación de mezcla asfáltica combinada con RAP y RCD como sustitución parcial de agregados para la Antigua Panamericana Sur, Chilca-Cañete 2020*. Lima: Universidad César Vallejo. Disponible en: <https://bit.ly/3oduraR>.

Ji, Y. y Wang, D. (2023). *Constitutive model of waste brick concrete based on Weibull strength theory*. Science Direct. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01738>.

Jiménez, J., Ayuso, J., Galvín, A., López, M. y Agrela, F. (2012). *Uso de áridos mixtos reciclados de baja energía incorporada a partir de RCD no seleccionados en caminos rurales no pavimentados*. Science Direct. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.02.042>.

Leite, F., Motta, R., Vasconcelos, K. y Bernucci, L. (2011). *Evaluación en laboratorio de residuos de construcción y demolición reciclados para pavimentos*. Science Direct. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.11.105>.

Li, B., Wang, Y., Jin., Q. y Chen, H. (2019). *Características de licuefacción de los áridos de hormigón reciclado*. Science Direct. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0267726118307061>.

Liu, J., Wang, W., Wang, Y., Zhou, X., Wang, S., Liu, Q. y Yu, B. (2023). *Hacia la utilización sostenible de escoria de acero en pavimentos asfálticos: un estudio de caso de resistencia a la humedad y evaluación del ciclo de vida*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01722>.

Méndez, A. (2015). *Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10654/13208>.

Norma Europea EN 12620 (2002).

Norma Europea EN 13242 (2002).

Norma Europea EN 13139 (2002).

Norma NTC 6422 (ICONTEC, 2021)

Olivera, S. (2017). *Recomendaciones técnicas sobre las especificaciones actuales respecto al uso de material reciclado RCD provenientes de construcciones verticales en bases y sub-bases en pavimentos de la malla vial de Bogotá*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/515806117/OliveraRiosStefania2017-1#>.

Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2021).

Petkovic, G., Engelsen, C., Håøya, A. y Breedveld, G. (2004). *Impacto ambiental del uso de materiales reciclados en la construcción de carreteras: método para la toma de decisiones en Noruega*. Science Direct. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2004.04.004>.

Pourkhorshidi, S., Sangiorgi, C., Torreggiani, D. y Tassinari, P. (2020). *Uso de agregados reciclados de residuos de construcción y demolición en capas de pavimentos sin unir*. Italia: Universidad de Bolonia. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/22/9386>.

Resolución 0472 del 2017 del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo sostenible colombiano. (2021)

Resolución 1257 del 2021 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible colombiano. (2021)

Ríos, G. (2019). *Infraestructura y logística: herramientas para el desarrollo económico*. Caracas: Banco de Desarrollo de América Latina. Disponible en: <https://bit.ly/3MNkgE3>.

Robinson G., Menzie, .D. y Hyun H. (2004). *Reciclaje de escombros de construcción como agregados en la región del Atlántico Medio, EE. UU.* Science Direct. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.04.006>.

Rodríguez, F. y 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*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Disponible en: <https://bit.ly/3H2BDgx>

Sangiorgi, C., Lantieri, C. y Dondi, G. (2015). *Reciclaje de residuos de construcción y demolición: una aplicación para la construcción de carreteras*. International Journal of Pavement Engineering. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943134>.

Sierra, N. (2020). Residuos de construcción y demolición (RCD), construcción en la ciudad de Bogotá y la metodología PMBOK. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Disponible en: <https://bit.ly/3GOsJTD>.

Villate, E. (2020). *Diseño de la estructura de pavimento flexible para la vía ubicada en la Carrera 111 entre Calles 135 y 135b, de la localidad de Suba de la Ciudad de Bogotá, utilizando una capa granular con material RCD*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/36306>.

World Economy Forum (2018)

Zhang, Y., Cetin, B. y Edil, T. (2021). *Evaluación del desempeño estacional de la base del pavimento utilizando materiales reciclados*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su132212714>.

Anexos

Anexo 1- Especificaciones INVIAS para agregados sub-base granular

Tabla 320 - 3. Franjas granulométricas del material de sub-base granular

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
	50.0	37.5	25.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	2"	1 ½"	1"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA									
SBG-50	100	70-95	60-90	45-75	40-70	25-55	15-40	6-25	2-15
SBG-38	-	100	75-95	55-85	45-75	30-60	20-45	8-30	2-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %				6 %			3 %

Fuente: INVIAS, artículo 3.

Anexo 2- Especificaciones INVIAS para agregados base granular

Tabla 330 - 3. Franjas granulométricas del material de base granular

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	1 ½"	1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA								
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN GRUESA								
BG-40	100	75-100	65-90	45-68	30-50	15-32	7-20	0-9
BG-27	-	100	75-100	52-78	35-59	20-40	8-22	0-9
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA								
BG-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG-25	-	100	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %			3 %

Fuente: INVIAS, artículo 3

Anexo 3- Datos de la muestra de ARC para ensayo de granulometría

Masa húmeda (g)	16030
Masa seca antes de lavado (g)	15365
Masa seca despues de lavado (g)	13215
Humedad de la muestra (%)	4
Masa de finos lavados (g)	2150
Masa total (g)	15365

Fuente: elaboración propia.

Anexo 4- Datos del material de aporte para ensayo de granulometría

Masa húmeda (g)	6810
Masa seca antes de lavado (g)	6560
Masa seca despues de lavado (g)	6438
Humedad de la muestra (%)	4%
Masa de finos lavados (g)	122
Masa total (g)	6560

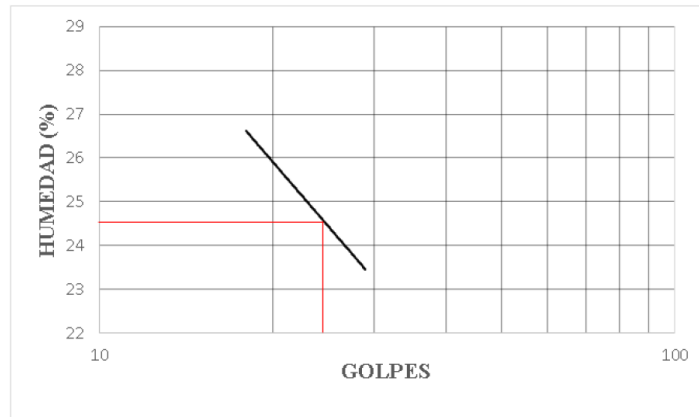
Fuente: elaboración propia.

Anexo 5- Resultados límite líquido

Ensayo No	1	2	3
Número de golpes	18	20	29
Capsula No	1	2	3
Masa cápsula + suelo hum (g)	27.909	26.634	28.694
Masa cápsula + suelo seco (g)	24.936	24.634	26.403
Masa agua (g)	12.873	17.495	16.571
Masa cápsula (g)	2.973	2	2.291
Masa suelo seco (g)	12.063	7.139	9.832
Humedad (%)	25	28	23
Límite plásctico	21		

Fuente: elaboración propia.

Anexo 6- Determinación de límite líquido gráficamente



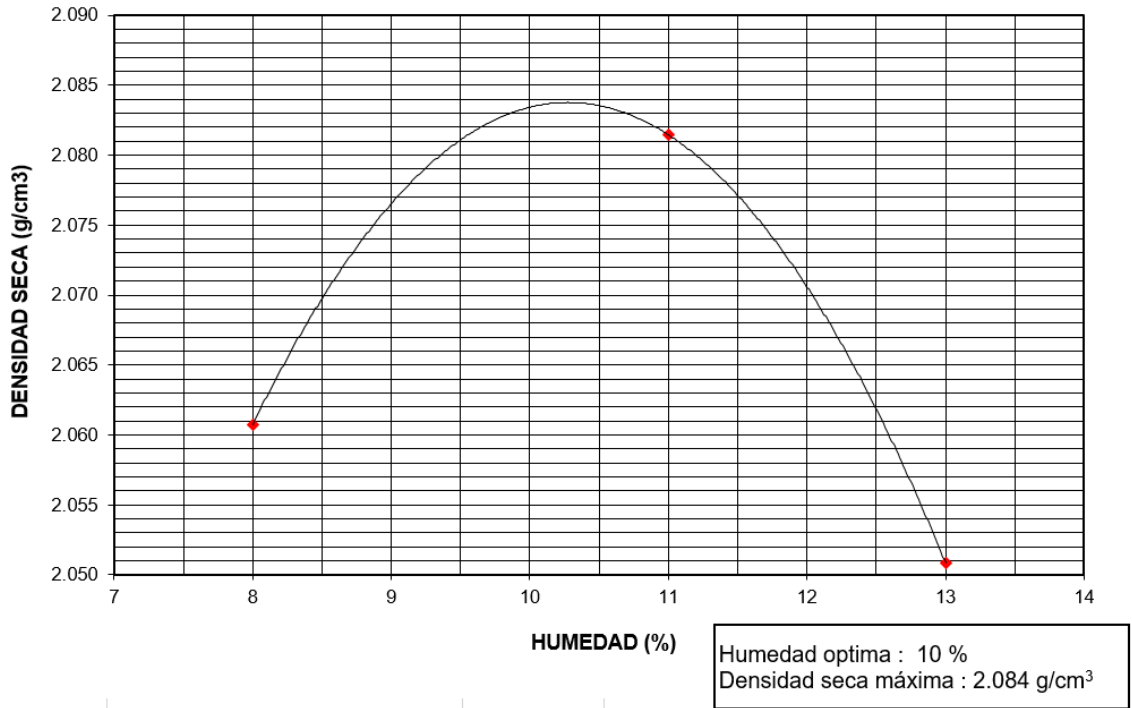
Fuente: elaboración propia.

Anexo 7- Datos de curva de compactación por proctor modificado para ARC

Prueba N°	1	2	3	4	5
N° de golpes		56	56	56	56
Humedad deseada (%)		7.0	9.0	11.0	
Humedad Inicial de la muestra (%)		5.0	5.0	5.0	
Humedad adicional (%)		2.0	4.0	6.0	
Peso muestra húmeda (g)		7500	7500	7500	
Peso muestra seca (g)		7143	7143	7143	
Agua adicional (cm ³)		143	286	429	
Molde N°		37	28	37	
Peso muestra húmeda más molde (g)		9795	9530	9990	
Peso molde (g)		5070	4625	5070	
Peso muestra húmeda (g)		4725	4905	4920	
Humedad de horno (%)		8	11	13	
Peso muestra seca (g)		4375	4419	4354	
Volumen del molde (cm ³)		2123	2123	2123	
Densidad muestra seca (g/cm ³)		2.061	2.081	2.051	
CBR	Expansión primer día. 0,001"				
	Expansión segundo día. 0,001"				
	Expansión tercer día. 0,001"				
	Expansión cuarto día. 0,001"				
	Expansión (%)				

Fuente: elaboración propia.

Anexo 8- Curva de compactación por proctor modificado para ARC



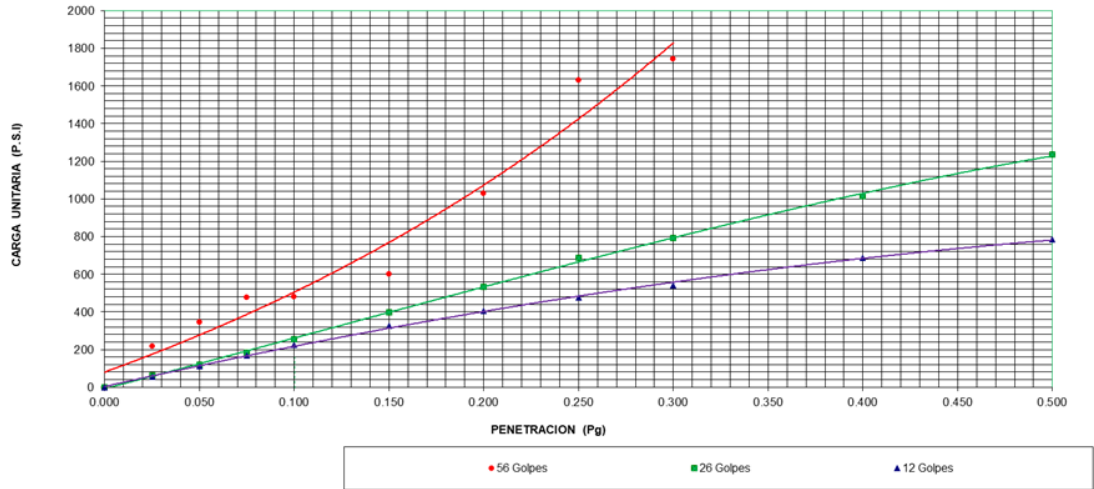
Fuente: elaboración propia.

Anexo 9- Datos para CBR de ARC

Molde N°	33			37			42		
N° Golpes	56			25			10		
Días Inmersión	0			0			0		
Expansion (Pg)									
PENERACION (Pg)	LECT.	PRESION	CBR	LECT.	PRESION	CBR	LECT.	PRESION	CBR
0.000	41	0		0	0		0	0	
0.025	89	218		25	61		22	54	
0.050	140	343		49	120		46	113	
0.075	195	478		74	181		69	169	
0.100	196	480	48	104	255	25	91	223	22
0.150	245	600		163	399		133	326	
0.200	420	1029	69	218	534	36	166	407	27
0.250	665	1629		280	686		195	478	
0.300	712	1744		323	791		221	541	
0.400	800			414	1014		281	688	
0.500	1000			504	1235		320	784	
% w PENETRA									
				CONSTANTE DEL ANILLO :			2.45 PSI		

Fuente: elaboración propia.

Anexo 10- Gráfica CBR para ARC



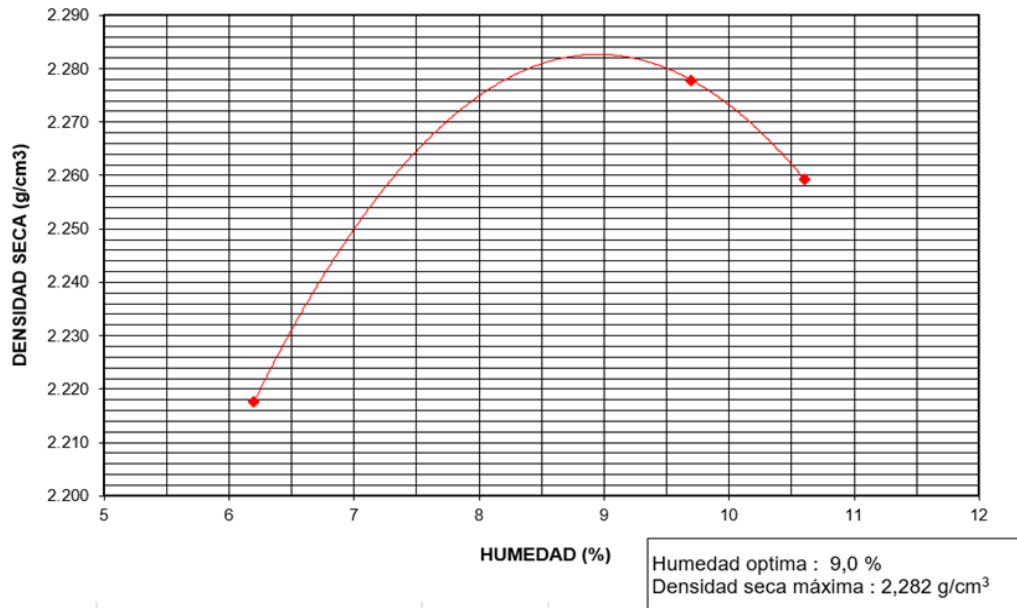
Fuente: elaboración propia.

Anexo 11- Datos de curva de compactación por proctor modificado para material de aporte

Prueba N°	1	2	3	4	5
N° de golpes		56	25	10	
Humedad deseada (%)		10	10	10	
Humedad Inicial de la muestra (%)		7.0	7.0	7.0	
Humedad adicional (%)		3.0	3	3	
Peso muestra humeda (g)		7500	7500	7500	
Peso muestra seca (g)		7009	7009	7009	
Agua adicional (cm ³)		210	210	210	
Molde N°		40	28	37	
Peso muestra humeda mas molde (g)		9957	9010	8665	
Peso molde (g)		5070	4625	5070	
Peso muestra humeda (g)		4887	4385	3595	
Humedad de horno (%)		8	11	13	
Peso muestra seca (g)		4525	3950	3181	
Volumen del molde (cm ³)		2123	2123	2123	
Densidad muestra seca (g/cm ³)		2.131	1.861	1.499	
CBR	Expansion primer dia. 0,001"				
	Expansion segundo dia. 0,001"				
	Expansion tercer dia. 0,001"				
	Expansion cuarto dia. 0,001"				
	Expansion (%)				

Fuente: elaboración propia.

Anexo 12- Curva de compactación por proctor modificado para material de aporte



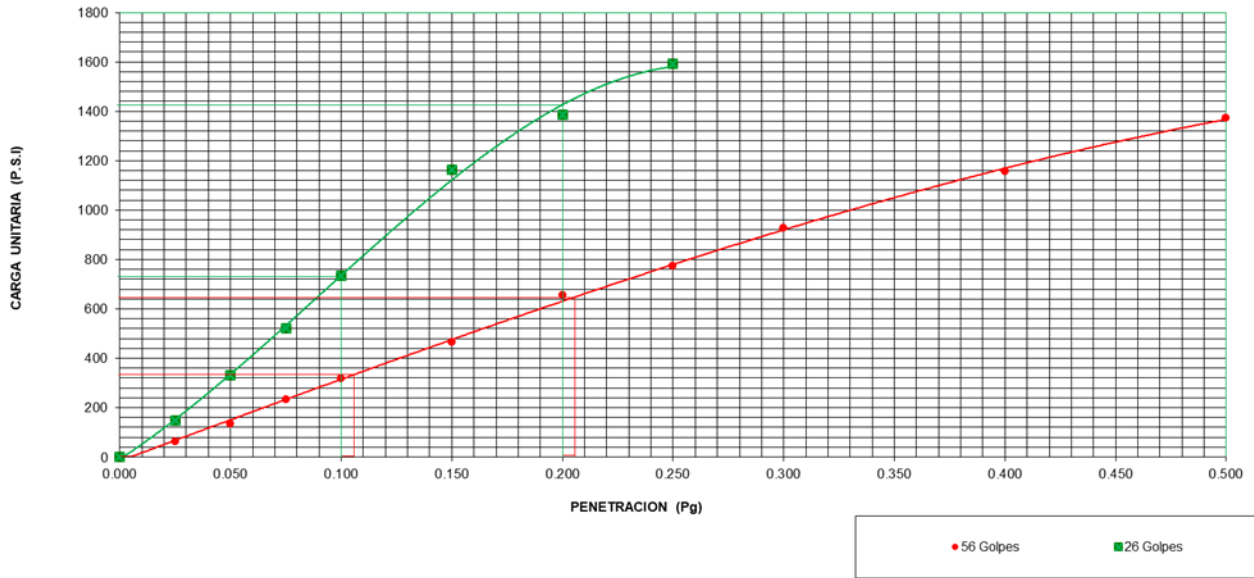
Fuente: elaboración propia.

Anexo 13- Tabla con datos para CBR de ARC

Molde N°	40			30		
N° Golpes	25			56		
Días Inmersión	0			0		
Expansion (Pg)						
PENERACION (Pg)	LECT.	PRESION	CBR	LECT.	PRESION	CBR
0.000	0	0		0	0	
0.025	25	61		60	147	
0.050	55	135		135	331	
0.075	95	233		213	522	
0.100	130	319	32	300	735	74
0.150	190	466		475	1164	
0.200	267	654	44	566	1387	92
0.250	316	774		650	1593	
0.300	378	926				
0.400	472	1156				
0.500	560	1372				
% w PENETRACION						
CONSTANTE DEL ANILLO :				2.45		

Fuente: elaboración propia.

Anexo 14- Gráfica CBR para material de aporte



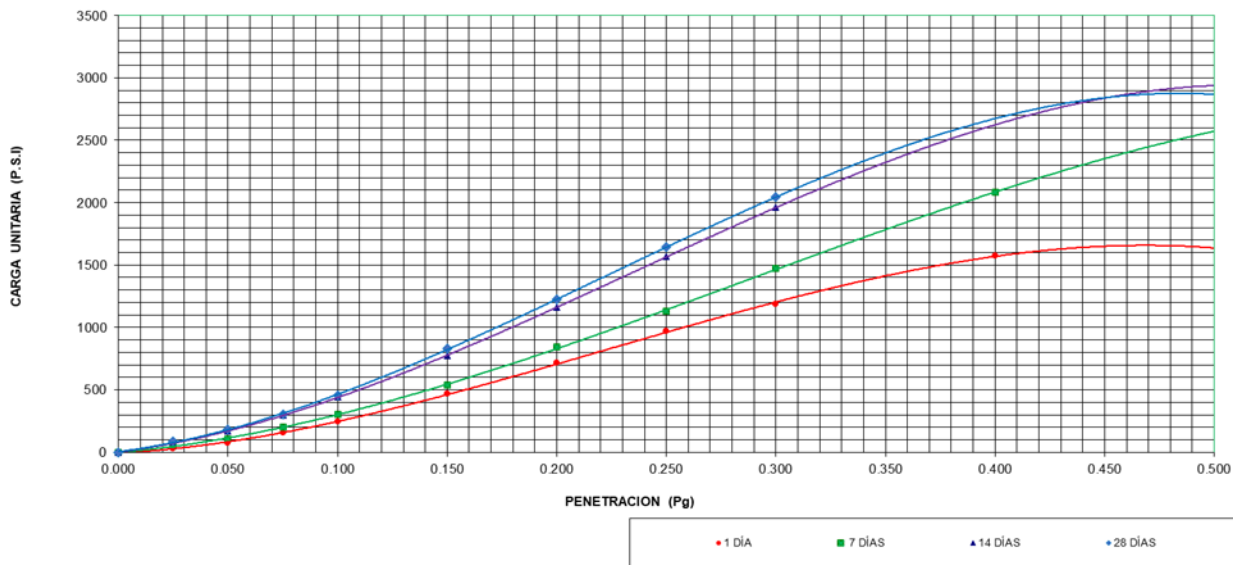
Fuente: elaboración propia.

Anexo 15- Datos para CBR de ARC con material de aporte como base

Molde N°	3			4			28		
N° Golpes	56			56			56		
Días de curado	1			14			28		
PENETRACION (Pg)	LECT.	PRESION	CBR	LECT.	PRESION	CBR	LECT.	PRESION	CBR
0.000	0	0		0	0		0	0	
0.025	18	44		3	7		20	49	
0.050	43	105		13	32		45	110	
0.075	68	167		42	103		75	184	
0.100	92	225	23	105	257	26	127	311	31
0.150	143	350		202	495		190	466	
0.200	193	473	32	300	735	49	342	838	56
0.250	245	600		472	1156		430	1054	
0.300	292	715		615	1507		560	1372	
0.400	385	943		860	2107		855	2095	
0.500	475	1164							
% w PENETRACION									
				CONSTANTE DEL ANILLO :			2.45 PSI		

Fuente: elaboración propia.

Anexo 18- Gráfica CBR de ARC con material de aporte como sub-base



Fuente: elaboración propia.

Anexo 19- Tabla de datos para ensayo de módulo resiliente de ARC

Alfura (mm)	300,64	Area mm ²	17671,5	Area m ²	0,01767
Diametro (mm)	150,00	Volumen cm ³	5312,8		
INFORMACION DEL ENSAYO	Acondicionamiento ε > 5%	Ensayo ε > 8%	Numero de secuencias		
	NO	NO	15		

Humedad inicial	10,0
Humedad final	10,0
Densidad seca máxima (g/cm ³)	2,080

Parametro	Fresion de camara	Esfuerzo Ciclico	Ciclo No.	Carga maxima axial real	Carga ciclica aplicada real	Carga de contacto aplicada real	Esfuerzo maximo real aplicado	Esfuerzo ciclico aplicado real (esfuerzo desviador ciclico real)	Esfuerzo de contacto aplicado real	Deformacion resiliente lectura TLDV #1	Deformacion resiliente lectura TLDV #2	Deformacion resiliente promedio	Deformacion resiliente unitaria	Modulo resiliente
Designación	S _s	S _{ciclico}	C _i	P _{max}	P _{ciclico}	P _{contacto}	S _{max r}	S _{ciclico r}	S _{contacto r}	H ₁	H ₂	H _{promedio}	ε _r	M _r
Unidad	kPa	kPa	un	N	N	N	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	mm/mm	Mpa
	103,4	93,1	0	1816	1663	182	102,8	94,1	10,3	0,221	0,234	0,228	0,0008	124,39
	20,7	18,6	1	384	337	38	21,7	19,1	2,2	0,086	0,082	0,084	0,0003	68,29
	20,7	37,3	2	722	700	72	40,9	39,6	4,1	0,149	0,152	0,151	0,0005	78,95
	20,7	55,9	3	1130	1059	113	63,9	59,9	6,4	0,199	0,195	0,197	0,0007	91,31
	34,5	31,0	4	635	580	64	36,0	32,8	3,6	0,122	0,117	0,120	0,0004	82,47
	34,5	62,0	5	1201	1165	120	68,0	65,9	6,8	0,200	0,200	0,200	0,0007	99,08
	34,5	93,1	6	1793	1682	179	101,5	95,2	10,1	0,238	0,248	0,243	0,0008	117,84
	68,9	62,0	7	1210	1151	121	68,5	65,2	6,8	0,159	0,166	0,163	0,0005	120,46
	68,9	124,1	8	2441	2260	244	138,1	127,9	13,8	0,256	0,267	0,262	0,0009	146,94
	68,9	186,1	9	3659	3388	366	207,1	191,7	20,7	0,339	0,339	0,339	0,0011	170,06
	103,4	62,0	10	1250	1136	125	70,8	64,3	7,1	0,137	0,143	0,140	0,0005	137,76
	103,4	93,1	11	1830	1671	183	103,6	94,6	10,4	0,193	0,189	0,191	0,0006	149,08
	103,4	186,1	12	3650	3389	365	206,5	191,8	20,7	0,320	0,307	0,314	0,0010	183,87
	137,9	93,1	13	1805	1672	181	102,2	94,6	10,2	0,166	0,176	0,171	0,0006	166,51
	137,9	124,1	14	2413	2249	241	136,5	127,3	13,7	0,221	0,226	0,223	0,0007	171,29
	137,9	248,2	15	4884	4340	488	276,4	245,6	27,6	0,355	0,351	0,353	0,0012	209,29

Fuente: elaboración propia.

Anexo 20- Tabla de datos para ensayo de módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como base

Altura (mm)	301,92	Area mm ²	17884,2	Area m ²	0,01788	Humedad inicial	9,0
Diametro (mm)	150,90	Volumen cm ³	5399,6			Humedad final	9,0
INFORMACION DEL ENSAYO	Acondicionamiento $\epsilon > 5\%$	Ensayo $\epsilon > 5\%$	Numero de secuencias	Densidad seca máxima (g/cm ³)			
	NO	NO	15	2,180			

Parametro	Presion de camara	Esfuerzo Ciclico	Ciclo No.	Carga maxima axial real	Carga ciclica aplicada real	Carga de contacto aplicada real	Esfuerzo maximo real aplicado	Esfuerzo ciclico aplicado real (esfuerzo desviador ciclico real)	Esfuerzo de contacto aplicado real	Deformacion resiliente lectura TLDV #1	Deformacion resiliente lectura TLDV #2	Deformacion resiliente promedio	Deformacion resiliente unitaria	Modulo resiliente
Designación	S ₃	S _{ciclico}	C ₁	P _{max}	P _{ciclico}	P _{contacto}	S _{max r}	S _{ciclico r}	S _{contacto r}	H ₁	H ₂	H _{promedio}	ϵ_r	M _r
Unidad	kPa	kPa	un	N	N	N	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	mm/mm	Mpa
103,4	93,1	0	0	1857	1699	186	103,8	95,0	10,4	0,283	0,300	0,292	0,0010	98,38
20,7	18,6	1	1	393	336	39	22,0	18,8	2,2	0,105	0,109	0,107	0,0004	52,97
20,7	37,3	2	2	774	690	77	43,3	38,6	4,3	0,190	0,183	0,187	0,0006	62,39
20,7	55,9	3	3	1093	1059	109	61,1	59,2	6,1	0,231	0,241	0,236	0,0008	75,76
34,5	31,0	4	4	621	569	62	34,7	31,8	3,5	0,154	0,160	0,157	0,0005	61,31
34,5	62,0	5	5	1236	1152	124	69,1	64,4	6,9	0,247	0,238	0,243	0,0008	80,20
34,5	93,1	6	6	1852	1695	185	103,6	94,8	10,4	0,282	0,290	0,286	0,0009	99,96
68,9	62,0	7	7	1251	1159	125	70,0	64,8	7,0	0,207	0,203	0,205	0,0007	95,33
68,9	124,1	8	8	2470	2282	247	138,1	127,6	13,8	0,301	0,320	0,310	0,0010	124,11
68,9	186,1	9	9	3687	3428	369	206,2	191,7	20,6	0,376	0,399	0,388	0,0013	149,19
103,4	62,0	10	10	1210	1161	121	67,6	64,9	6,8	0,168	0,161	0,165	0,0005	119,11
103,4	93,1	11	11	1865	1696	187	104,3	94,8	10,4	0,232	0,236	0,234	0,0008	122,32
103,4	186,1	12	12	3717	3427	372	207,8	191,6	20,8	0,359	0,359	0,359	0,0012	161,34
137,9	93,1	13	13	1851	1699	185	103,5	95,0	10,4	0,205	0,197	0,201	0,0007	142,69
137,9	124,1	14	14	2454	2304	245	137,2	128,8	13,7	0,253	0,263	0,258	0,0009	150,90
137,9	248,2	15	15	4922	4428	492	275,2	247,6	27,5	0,402	0,427	0,415	0,0014	180,31

Fuente: elaboración propia.

Anexo 21- Tabla de datos para ensayo de módulo resiliente de combinación de ARC con material de aporte como sub-base

Altura (mm)	302,45	Area mm ²	17907,9	Area m ²	0,01791	Humedad inicial	10,0
Diametro (mm)	151,00	Volumen cm ³	5416,2			Humedad final	10,0
INFORMACION DEL ENSAYO	Acondicionamiento $\epsilon > 5\%$	Ensayo $\epsilon > 5\%$	Numero de secuencias	Densidad seca máxima (g/cm ³)			
	NO	NO	15	2,120			

Parametro	Presion de camara	Esfuerzo Ciclico	Ciclo No.	Carga maxima axial real	Carga ciclica aplicada real	Carga de contacto aplicada real	Esfuerzo maximo real aplicado	Esfuerzo ciclico aplicado real (esfuerzo desviador ciclico real)	Esfuerzo de contacto aplicado real	Deformacion resiliente lectura TLDV #1	Deformacion resiliente lectura TLDV #2	Deformacion resiliente promedio	Deformacion resiliente unitaria	Modulo resiliente
Designación	S ₃	S _{ciclico}	C ₁	P _{max}	P _{ciclico}	P _{contacto}	S _{max r}	S _{ciclico r}	S _{contacto r}	H ₁	H ₂	H _{promedio}	ϵ_r	M _r
Unidad	kPa	kPa	un	N	N	N	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	mm/mm	Mpa
103,4	93,1	0	0	1854	1707	185	103,5	95,3	10,4	0,254	0,259	0,256	0,0008	112,56
20,7	18,6	1	1	396	340	40	22,1	19,0	2,2	0,102	0,100	0,101	0,0003	57,04
20,7	37,3	2	2	772	688	77	43,1	38,4	4,3	0,167	0,167	0,167	0,0006	69,56
20,7	55,9	3	3	1118	1065	112	62,5	59,4	6,2	0,205	0,218	0,211	0,0007	85,13
34,5	31,0	4	4	628	578	63	35,1	32,3	3,5	0,144	0,142	0,143	0,0005	68,30
34,5	62,0	5	5	1238	1185	124	69,1	66,1	6,9	0,216	0,220	0,218	0,0007	91,70
34,5	93,1	6	6	1872	1707	187	104,5	95,3	10,5	0,257	0,247	0,252	0,0008	114,25
68,9	62,0	7	7	1220	1169	122	68,1	65,3	6,8	0,182	0,186	0,184	0,0006	107,36
68,9	124,1	8	8	2497	2283	250	139,5	127,5	13,9	0,264	0,280	0,272	0,0009	141,75
68,9	186,1	9	9	3721	3433	372	207,8	191,7	20,8	0,366	0,352	0,359	0,0012	161,45
103,4	62,0	10	10	1269	1163	127	70,9	65,0	7,1	0,149	0,146	0,148	0,0005	132,94
103,4	93,1	11	11	1887	1701	189	105,4	95,0	10,5	0,204	0,208	0,206	0,0007	139,39
103,4	186,1	12	12	3697	3432	370	206,5	191,7	20,6	0,310	0,316	0,313	0,0010	185,09
137,9	93,1	13	13	1848	1705	185	103,2	95,2	10,3	0,176	0,172	0,174	0,0006	165,52
137,9	124,1	14	14	2442	2285	244	136,4	127,6	13,6	0,221	0,217	0,219	0,0007	176,07
137,9	248,2	15	15	4968	4365	497	277,4	243,7	27,7	0,345	0,345	0,345	0,0011	213,80

Fuente: elaboración propia.

Anexo 22- Normas de referencia de los ensayos

ENSAYO		NORMA DE ENSAYO INV
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (Gradación A) (%)	500 Revoluciones	E-218
	100 Revoluciones	
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval (%)		E-238
Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos (KN)		E-224
Límite líquido (%)		E-125
Índice de plasticidad (%)		E-125 y E-126
Equivalente de arena (%)		E-133
Valor de azul de metileno		E-235
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznableles (%)		E-211
Índice de alargamiento y aplanamiento (%)	Índice de alargamiento	E-230
	Índice de aplanamiento	
Caras fracturadas (%)	Una cara	E-227
	Dos caras	
Angularidad de la fracción fina (%)		E-239
Gravedad específica seca al horno	Fracción gruesa	E- 222 y E-223
	Fracción fina	
Absorción (%)	Fracción gruesa	
	Fracción fina	
CBR (%)		E-148
Módulo Resiliente (Mpa)		E-156
Módulo Resiliente (Mpa)		E-156
CBR en los días 1, 7, 14 y 28 después del curado		E-148
Resistencia a la compresión (Mpa)		E-632

Fuente: elaboración propia.