

**REEMPLAZO DE LOS AGREGADOS CONVENCIONALES EN MEZCLA  
ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE MDC-19 POR RESIDUOS PRODUCTO DE  
DEMOLICIÓN DE MAMPOSTERÍA Y CONCRETO**

**WILLIAM FERNANDO RUIZ GALLARDO  
NELSON GERMAN VILLOTA VERGARA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2019**

**REEMPLAZO DE LOS AGREGADOS CONVENCIONALES EN MEZCLA  
ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE MDC-19 POR RESIDUOS PRODUCTO DE  
DEMOLICIÓN DE MAMPOSTERÍA Y CONCRETO**

**WILLIAM FERNANDO RUIZ GALLARDO  
NELSON GERMAN VILLOTA VERGARA**

**Trabajo de grado para optar por el título de: INGENIERO CIVIL  
Modalidad: Investigación**

**Director: PhD. Juan Gabriel Bastidas Martínez  
Docente Investigador Universidad Piloto de Colombia**

**Codirector: MsC. Jorge Luis Argoty Burbano  
Docente Universidad de Nariño**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2019**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

“Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo de grado son responsabilidad exclusiva del autor”. Artículo 1 del acuerdo No.324 del 11 de octubre de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”. Artículo 13, Acuerdo N.005 del 26 de enero de 2010, emanado del honorable Consejo Académico de la Universidad de Nariño.

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTÍNEZ  
Director

---

JORGE LUIS ARGOTY BURBANO  
Codirector

---

Jurado 1

---

Jurado 2

San Juan de Pasto, Junio de 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

JUAN GABRIEL BASTIDAS MARTÍNEZ. Ingeniero civil PhD, por la idea de investigación, orientación y el apoyo constante en el desarrollo de los procesos.

JORGE LUIS ARGOTY BURBANO. Ingeniero civil MsC, por su orientación, por sus aportes y recomendaciones en este proyecto.

GUSTAVO PONCE. Laboratorista de la Universidad de Nariño, por su contribución en el desarrollo de ensayos de laboratorio.

ASFACON SP. Por su apoyo a la investigación con la donación del asfalto y la visita a las instalaciones de la compañía.

ESCOMBRERA SANTANDER. Por su apoyo a la investigación con los residuos producto de demolición.

**En memoria de:**

**HORTENCIA MARTÍNEZ DE GALLARDO  
ALICIA GIRALDO TORO**

**Creieron siempre en nuestras capacidades  
y vivirán por siempre en nuestras historias.**

## RESUMEN

Con el propósito de colaborar a la mitigación del daño ambiental causado por los residuos demolición, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal estudiar a los agregados reciclados producto de demolición de mampostería y concreto, siguiendo especificaciones técnicas para su aplicación a una mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19. Para tal fin, se caracterizó en conjunto a los agregados convencionales y a los agregados reciclados producto de la trituración de los residuos de demolición generados en la ciudad de Pasto para su uso en la construcción de capas de rodadura en pavimento asfáltico, se evaluaron sus propiedades físicas y mecánicas haciendo uso de las especificaciones para ensayos de materiales del Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Posteriormente, se realizaron los diseños de tres MDC-19 por medio de la metodología Marshall. En el proceso se realizó tres mezclas: (I) Agregados convencionales. (II) 100% Agregado reciclado y finalmente (III) Reemplazo del 100% del agregado grueso y fino convencional. A estas mezclas se les evaluó propiedades físicas y mecánicas como: estabilidad, flujo, parámetros volumétricos y tracción indirecta. Finalmente, una extracción de asfalto para evaluar la quiebra de partículas en el proceso de compactación.

Como resultado del proceso se encontró un mayor consumo de asfalto para probetas desarrolladas con agregados reciclados, una menor estabilidad y flujo, con un porcentaje de vacíos inferior, en relación a la mezcla con agregado convencional, así como también una mayor susceptibilidad al agua evaluada mediante pruebas de tracción indirecta, finalmente con base en los resultados se propuso su uso como base estabilizada con emulsión asfáltica.

**Palabras clave:** Agregados reciclados, Mezcla asfáltica, Pavimentos, Residuos de demolición.

## **ABSTRACT**

In order to help mitigate the environmental damage caused by the demolition waste, the main objective of this research work was to study recycled aggregates from masonry and concrete demolition, following technical specifications for application to a dense hot asphalt mixture MDC-19. It was characterized in conjunction with conventional aggregates and recycled aggregates resulting from the crushing of demolition waste generated in the city of Pasto for use in the construction of treads in pavement asphaltic, their physical and mechanical properties were evaluated using the specifications for materials testing from the National Institute of Roads, INVIAS. Three mixtures were made in the process: (I) Conventional attachments. (II) 100% recycled aggregate and finally (III) Replacement of 100% of the conventional thick and fine aggregate. These mixtures were evaluated for physical and mechanical properties such as: stability, flow, volumetric parameters and indirect traction. Finally, an asphalt extraction to evaluate the particle breakdown in the compaction process.

As a result of the process, a higher consumption of asphalt was found for specimens developed with recycled aggregates, lower stability and flow, with a lower percentage of voids than the mixture with conventional aggregate and a greater susceptibility to water evaluated by indirect tensile tests, finally Based on the results, its use is proposed as a stabilized base with asphalt emulsion.

**Keywords:** Recycled aggregates, asphalt mix, pavements, demolition waste.

## CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN .....	16
Justificación .....	17
Objetivo General.....	18
Objetivos específicos .....	18
Alcance y delimitación .....	18
Estado de arte.....	19
Marco conceptual.....	24
Marco teórico .....	28
1. MATERIALES Y METODOLOGÍA .....	34
1.1. MATERIALES .....	34
1.1.1. Agregado natural o convencional.....	34
1.1.2. Agregados reciclado.....	36
1.1.3. Asfalto. ....	41
1.2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	43
1.2.1. Muestreo y reducción.....	43
1.2.2. Caracterización física.....	45
1.2.3. Resistencia mecánica .....	46
1.2.4. Forma de las partículas.....	49
1.2.5. Relaciones masa- volumen.....	51
1.3. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	53
1.3.1. Dosificación de las mezclas asfálticas.....	53
1.3.2. Método Marshall. ....	56
1.3.3. Estabilidad y flujo. ....	57
1.3.4. Parámetros volumétricos. ....	59
1.3.5. Contenidos óptimos. ....	60

1.3.6. Tracción indirecta.....	61
1.3.7. Evaluación de quiebra de partículas. ....	62
1.4. CANTIDAD DE ENSAYOS .....	63
1.5. ANÁLISIS ANOVA .....	63
2. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	65
2.1. AGREGADOS.....	65
2.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	71
2.3. FORMA DE FALLA. ....	82
2.4. TRACCIÓN INDIRECTA.....	83
2.5. ANÁLISIS ANOVA .....	86
2.6. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA COMO CAPA DE RODADURA.....	88
2.7. ANÁLISIS COMO BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN .....	89
3. CONCLUSIONES .....	91
4. RECOMENDACIONES.....	95
BIBLIOGRAFÍA.....	96
ANEXOS.....	101

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág</b>
Tabla 1. Especificaciones para caracterización de agregados .....	32
Tabla 2. Especificaciones para caracterización de mezclas asfálticas .....	33
Tabla 3. Clasificación de residuos de construcción y demolición- RCD .....	38
Tabla 4. Resumen de las características del asfalto 80/100.....	41
Tabla 5. Temperaturas de mezcla y compactación. ....	42
Tabla 6. Densidad máxima teórica de briqueta de referencia.....	55
Tabla 7. Análisis para deducir el peso para la dosificación los materiales reciclados a partir del volumen. ....	56
Tabla 8. Requisitos de la mezcla asfáltica MDC-19 para NT3.....	60
Tabla 9. Densidad bulk de los materiales. ....	66
Tabla 10. Densidad relativa, densidad relativa SSS, densidad relativa aparente y absorción. ....	66
Tabla 11. Resumen de caracterización de los agregados gruesos. ....	69
Tabla 12. Resumen de la caracterización de agregados finos. ....	70
Tabla 13. Resultados y especificaciones de los materiales evaluados en el presente proyecto. ....	71
Tabla 14. Resultados y especificaciones de las mezclas asfálticas evaluadas en la investigación para las mezclas con contenidos óptimos de asfalto. ....	75
Tabla 15. Datos promedio de estabilidad y flujo para los tres diferentes tipos de mezcla. ....	77
Tabla 16. Comparación de los parámetros volumétricos entre la especificación INV-E 799 y la corrección propuesta en la investigación. ....	79
Tabla 17. Índice de quiebra de partículas .....	82
Tabla 18. Ensayo de tracción indirecta a mezcla con agregados convencionales. ....	84

Tabla 19.	Ensayo de tracción indirecta a mezcla con agregados reciclado.....	84
Tabla 20.	Ensayo de tracción indirecta a mezcla con reemplazo de agregado grueso.....	84
Tabla 21.	Resumen datos ANOVA .....	87
Tabla 22.	Prueba múltiple de rangos. ....	87
Tabla 23.	Criterios mínimos encontrados en la investigación para el diseño preliminar de mezcla asfáltica densa en caliente por el método Marshall y especificación de la tabla 450-10 del Art450-13 .....	88
Tabla 24.	Requisitos del artículo Art 340-13 para emplear un agregado en Bases estabilizada con emulsión asfáltica.....	89

## TABLA DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
Figura 1. Estructura de pavimento .....	25
Figura 2. Agregado grueso natural. ....	26
Figura 3. Agregado reciclado .....	27
Figura 4. Escombros en obra (Proceso de demolición). ....	29
Figura 5. Densidad de las partículas de agregado reciclado en función del contenido de mortero adherido. ....	30
Figura 6. Absorción de las partículas de agregado reciclado en función del contenido de mortero adherido .....	30
Figura 7. Planta de trituración .....	31
Figura 8. Ubicación espacial de la cantera la Vega. ....	34
Figura 9. Señalización de la geología presente cerca de la cantera.....	35
Figura 10. Escombrera Santander .....	36
Figura 11. Escombros A) Sitio de depósito. B) Almacenamiento en laboratorio.....	37
Figura 12. Proceso de trituración y separación del material .....	39
Figura 13. Superficies de las partículas de los agregados.....	39
Figura 14. Distribución de elementos que conforman el agregado grueso .....	40
Figura 15. Distribución de elementos que conforman el agregado grueso .....	40
Figura 16. Curva de viscosidad en función de la temperatura del asfalto.....	42
Figura 17. SBIT. Módulo dinámico del asfalto calculado con BANDS 2.0 .....	43
Figura 18. (A) Pila de material convencional (B) Pila de residuos de construcción.....	44
Figura 19. Cuarteador mecánico.....	44
Figura 20. (A) Serie de tamices (B) Material separado por tamaños .....	45
Figura 21. Ensayo de adhesividad (A) Agregado reciclado. (B) Agregado convencional.....	46

Figura 22.	Procedimiento para el ensayo de desgaste en máquina de los ángeles. ....	47
Figura 23.	Equipo micro-deval para ensayo de desgaste. ....	48
Figura 24.	Procedimiento para determinar el desgaste de agregados finos en micro-deval .....	48
Figura 25.	Procedimiento para determinar el índice de aplanamiento y alargamiento de las partículas. ....	49
Figura 26.	Procedimiento para determinar partículas planas y alargadas. ....	50
Figura 27.	Procedimiento para determinar densidad bulk de agregado grueso.	51
Figura 28.	Procedimiento para la determinación de gravedad específica de agregado fino. ....	52
Figura 29.	Montaje para determinar la gravedad específica de agregado grueso. ....	53
Figura 30.	Curva granulométrica de los agregados para la mezcla asfáltica. ....	54
Figura 31.	Dosificación por el método Marshall. ....	57
Figura 32.	Ensayo Marshall. ....	58
Figura 33.	Esquema del dispositivo para ensayo de corte directo. ....	61
Figura 34.	Índices de aplanamiento y alargamiento. ....	67
Figura 35.	Porcentaje de desgaste de los agregados en la máquina de los ángeles. ....	67
Figura 36.	Porcentaje de pérdidas de agregados gruesos en micro-deval. ....	68
Figura 37.	Porcentaje de pérdidas de los agregados finos en el micro deval. ....	68
Figura 38.	Grafica de estabilidad Vs % de asfalto .....	72
Figura 39.	Grafica flujo Vs % Asfalto .....	72
Figura 40.	Grafica relación estabilidad/flujo Vs % Asfalto .....	73
Figura 41.	Vacíos con aire Vs % de asfalto .....	73
Figura 42.	Vacíos en el agregado mineral Vs % de asfalto .....	74
Figura 43.	Vacíos llenos de asfalto Vs % de asfalto .....	74
Figura 44.	Interfaz ligante- agregado para un probeta de agregado reciclado. ....	78
Figura 45.	Granulometría de la mezcla realizada con agregado convencional. ....	80

Figura 46.	Granulometría de la mezcla realizada con agregados reciclados.....	80
Figura 47.	Granulometría de la mezcla realizada con agregado grueso reciclado y fino convencional .....	81
Figura 48.	Probetas luego de ensayo Marshall. (Izquierda) Probeta Convencional, (Centro) Probeta 100% Ag Reciclado, (Derecha) Probeta con reemplazo del agregado grueso. ....	83
Figura 49.	Probeta luego de ensayo Marshall con agregados reciclados.....	83
Figura 50.	Probeta de agregado convencional luego del ensayo de tracción indirecta .....	85
Figura 51.	Probeta de agregado reciclado luego del ensayo de tracción indirecta .....	85
Figura 52.	Probeta de agregado combinado luego del ensayo de tracción indirecta .....	85
Figura 53.	Resultados del ensayo de relación de tracción indirecta .....	86

## INTRODUCCIÓN

Se les da el nombre de residuos de construcción y demolición a los desechos que se producen en las actividades de construcción, demolición y reforma de obras civiles, generalmente y dependiendo de los cambios en la industria, dichos residuos están compuestos por: agregados, ladrillos, cerámicos, panel yeso, concreto, mortero, acero, madera, entre otros. En Colombia la última década se ha caracterizado por un incremento en la construcción de edificaciones residenciales y no residenciales, según el DANE<sup>1</sup> en el cuarto trimestre del 2018 el sector de la construcción experimento un incremento de su valor agregado en un 4,2% del PIB evidenciando los beneficios económicos que trae con sigo. Pero para que todas las actividades del sector de la construcción se lleven a cabo se requiere de una enorme disponibilidad de recursos, que en consecuencia a los procesos de transformación de materia prima producen una enorme cantidad de residuos sólidos, creando grandes impactos ambientales negativos, tales pueden afectar a; I) El medio Inerte es decir el clima, la atmosfera, la geología y la hidrología, II) El medio biótico compuesta por condiciones edáficas del suelo, la vegetación y la fauna, III) El medio humano que se define por condiciones socioeconómicas, sistemas de aprovechamientos de recursos, ocupación de suelos urbanos que se podrían destinar a otros usos y la degradación paisajística entre otros, como lo exponen: Mejía, Giraldo y Martínez<sup>2</sup>. En la actualidad existe una creciente tendencia para la utilización de materiales reciclados, no solo para reducir los costos de vertido o solventar problemas de abastecimiento, sino más bien se plantea como una forma de colaborar en el desarrollo sostenible a nivel mundial y a la creciente preocupación ambiental debido a la generación desmedida de residuos de construcción y demolición; Por ejemplo en todos los países que conforman la Unión Europea la cuantificación de los residuos de demolición producida puede superar los 700 millones de toneladas por año<sup>3</sup>, de los cuales si el país en cuestión posee regulaciones especificas respecto a los residuos de construcción y demolición, la tasa de reciclaje puede llegar a ser del 80%<sup>4</sup>, a nivel nacional, en Bogotá se producen 15 millones de toneladas al año, siendo escasas las alternativas de reciclaje, poco más de 5 %

---

<sup>1</sup> DANE, Boletín técnico, Indicadores económicos alrededor de la construcción (IEAC). Marzo de 2019.

<sup>2</sup> E. MEJÍA, J. GIRALDO, L. MARTÍNEZ “Residuos de construcción y demolición. Revisión sobre su composición, impactos y gestión. 2013. P117-118

<sup>3</sup> IACOBOAEA Cristina, ALDEA Mihaela and PETRESCU Florian, “CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE - A CHALLENGE FOR THE EUROPEAN UNION?”. February 2019, p 45

<sup>4</sup> IACOBOAEA Cristina, ALDEA Mihaela and PETRESCU Florian, op. cit , p. 47

10%<sup>5</sup>; A pesar de que el país cuenta con una amplia y profunda normativa en materia de gestión de escombros<sup>6</sup>, sin embargo la sola existencia de la normativa no garantiza su aplicación, además de la ausencia de especificaciones técnicas en cuanto al tratamiento de estos residuos. Es ahí donde surge la pregunta: ¿Es viable reciclar residuos de demolición generados en la ciudad de Pasto, para aplicarlos como agregados reciclados en mezclas asfálticas densas en caliente para estructuras de pavimento flexibles? En el desarrollo del presente trabajo de investigación, se realizaron pruebas necesarias para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los residuos de demolición de elementos en mampostería y concreto, con el fin de responder a la pregunta planteada, comparando los agregados reciclados con agregados naturales y analizando características basados en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

El presente trabajo de grado en modalidad de investigación se desarrolló en la línea de investigación de *geotecnia y pavimentos*, parte integral del programa de ingeniería civil, razón por la cual en el desarrollo del tema se utilizaron elementos conceptuales, técnicos y prácticos en torno a este eje del conocimiento.

### **Justificación**

La desmedida producción e inadecuada disposición de los residuos de construcción y demolición trae consigo una amplia gama de problemas sociales, económicos y principalmente ambientales. Por esta razón, el presente trabajo pretendió aprovechar el mayor porcentaje que sea posible a los materiales de desecho en las obras civiles de la ciudad de San Juan de Pasto para su respectiva aplicación a la construcción de pavimentos flexibles.

Investigaciones anteriores demuestran que este material presenta propiedades físicas y mecánicas que le permiten ser considerado un material granular para la fabricación de bases en una estructura de pavimento flexible.

En este sentido, se buscó re direccionar el flujo de los materiales de desecho en un ciclo de máxima reutilización para ayudar a mitigar los problemas de disposición y futuro desabastecimiento, debido al gasto económico y ambiental que implica la búsqueda y explotación de nuevos materiales. En el presente trabajo de investigación se realizó un análisis y aplicación de nuevos materiales que promuevan el desarrollo sostenible en la ciudad de san juan de pasto.

---

<sup>5</sup> CASTAÑO, Jesús O., MISLE RODRÍGUEZ Rodrigo Andrés LASSO Leonardo GÓMEZ CABRERA, Adriana, OCAMPO, Manuel S., Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. 2013, p38

<sup>6</sup> CARVAJAL Juan, CARMONA Charlie. “Gestión integral de residuos de construcción y demolición en Colombia: una aproximación basada en la metodología del marco lógico”. (Enero-Junio 2016), p 121

## **Objetivo General.**

Estudiar la aplicación de manera técnica de agregados reciclados producto de demolición en mezcla asfáltica densa en caliente para capas de rodadura en pavimentos flexibles, buscando generar una forma de disposición ambientalmente correcta.

## **Objetivos específicos**

- Caracterizar agregados pétreos convencionales comúnmente utilizados para mezclas de concreto asfáltico, así como agregados reciclados provenientes de escombros, según los lineamientos de las especificaciones INVIAS (2013)
- Realizar el diseño de mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19 con agregado reciclado y convencional por medio de la metodología Marshall, con el fin de obtener las cantidades óptimas de cemento asfáltico y conocer los parámetros volumétricos y de resistencia.
- Evaluar la viabilidad del uso de mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19 con agregados reciclados como capa de rodadura en una estructura de pavimento.

## **Alcance y delimitación**

El trabajo planteó aplicar agregados reciclados producto de la demolición de elementos en concreto y mampostería, en las condiciones que se encontraron en sitio a la Mezcla asfáltica Densa en Caliente de tamaño máximo 19mm (MDC-19) para determinar su comportamiento físico y mecánico en comparación con un agregado convencional.

El trabajo contempló el estudio de una muestra única de residuos de demolición obtenida de la escombrera Santander ubicada en el corregimiento de Obonuco en la ciudad de pasto. El trabajo de investigación buscó evaluar el comportamiento físico mecánico del material reciclado y su desempeño en la Mezcla asfáltica Densa en Caliente. A los residuos posteriormente se los redujo por trituración para ser usados como agregados en la mezcla asfáltica. Los agregados convencionales que se emplearon en el desarrollo del proyecto se obtuvieron de una cantera certificada para operar en la ciudad, de la misma forma que para los residuos de demolición; Se tomó una muestra única, lo anterior se realizó siguiendo la norma INV-E 201-13 del instituto nacional de vías. INVIAS.

Posterior al proceso de toma de muestras, se caracterizó los residuos a ser usados como agregados, evaluando sus propiedades físicas y mecánicas, ceñido a las

normas del Instituto Nacional de Vías INV-E 213, 217, 218, 222, 223, 230 y 240 (2013). Además de la aplicación de la norma brasilera del *Departamento Nacional de Estradas* Rodagem DNER-ME 078 (1994). Ensayos que se pueden desarrollar en el laboratorio de suelos y materiales de la Universidad de Nariño.

Finalmente se realizó los diseños de mezcla, usando la metodología Marshall descrita en la norma INV-E 748 (2013) y el Artículo ART 450-13 del Invias tanto para agregados reciclados como convencionales y comparar su comportamiento en laboratorio.

El asfalto empleado en el desarrollo de este trabajo fue asfalto convencional de penetración 80-100 normalizada de uso convencional en el país, por ser convencionalmente el más utilizado para la temperatura ambiente de la región. Basados en los resultados de los ensayos de caracterización y el diseño de mezclas, se evaluó la viabilidad de su empleo en mezclas de concreto asfáltico como capa de rodadura en estructuras de pavimento.

### **Estado de arte**

Los materiales producto de la demolición de obras civiles han sido un tema de creciente interés para la industria de la construcción y entidades ambientales alrededor del mundo. Por tal motivo se han desarrollado investigaciones encaminadas a buscar alternativas para su empleo y evitar así que estos se dispongan de manera inadecuada. El no aprovechamiento de los residuos causa problemáticas ambientales como la disposición inadecuada, la reducción de vida útil de los sitios de depósito, contaminación de fuentes hídricas, entre otros<sup>7</sup>.

Los residuos de construcción vertidos en un depósito tienen números efectos negativos, E. Mejía, J. Giraldo y L. Martínez<sup>8</sup> mencionan entre los más destacados: Perdidas de recursos naturales, degradación en la calidad del paisaje, alteración de drenajes naturales y pérdida de suelo productivo, resaltan también problemáticas ambientales por los procesos de transporte desde los sitios de recolección hasta los sitios de depósito, sin dejar de lado la afectación que generan sobre los pavimentos los vehículos de transporte. De acuerdo con los autores, el impacto que generan los RCD se pudo clasificar así:

- Consumo de materias primas y energía.
- Modificaciones geomorfológicas
- Contaminación de acuíferos
- Contaminación atmosférica

---

<sup>7</sup> Alcaldía de Bogotá. Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra. p 1-13

<sup>8</sup> E. Mejía, J. Giraldo, L. Martínez, op. cit, P.13

- Perdida de habitat
- Entre otros

Por las problemáticas mencionadas se han desarrollado diversas investigaciones para promover el uso de los residuos de demolición y construcción en la industria, los autores V. Antunes, A. Freire, L. Quaresma y R. Micaelo<sup>9</sup>, tienen como objetivo evaluar el uso de diferentes materiales de desecho (Residuos de demolición y construcción, polvo de ladrillo y cenizas volantes) como llenante mineral en mezclas asfálticas, la muestra de referencia fue un llenante proveniente de piedra caliza. Además de investigar la caracterización de los materiales de residuo y la interacción de esta con el ligante bituminoso usando métodos convencionales, en primer lugar realizaron la caracterización física, geométrica y química, posteriormente hicieron mezclas asfálticas con diferentes ligantes para estudiar su interacción, se usó la prueba de absorción y la prueba del anillo y bola, también se midió la susceptibilidad de la mezcla con presencia de residuos con un ligante.

Se encontró que los materiales de desecho tienen una gradación más fina que el llenante de piedra caliza, la superficie específica tiene una amplia ventana debido a las formas y texturas de las partículas, teniendo los RCD y el polvo de ladrillo una forma angular. La rigidez se ve aumentada por el polvo de ladrillo mientras que la ceniza volante le induce menos rigidez. La máxima relación llenante/ ligante (f/b) varía inversamente con los valores de vacíos y el número de ligante, aunque también se puede aplicar otros modelos encontrados en la literatura (para rellenos naturales e industriales) para llenantes de desecho; La relación f/b para una combinación específica de ligante y relleno se puede obtener a partir de la máxima relación f/b del aumento de rigidez esperado.

A nivel internacional Acosta, Moll y Gonzales<sup>10</sup>, estudiaron la utilización de los agregados reciclados tipo concreto en las mezclas asfálticas en caliente.

Realizaron una evaluación con respecto a las especificaciones de la Norma Cubana a fracciones provenientes de la trituración de probetas de hormigón originarias de la Habana Cuba, estos estudios fueron aplicados a la fracción gruesa como a la fracción fina de los agregados reciclados. Una vez caracterizados estos agregados se diseñaron cinco Mezclas Asfálticas en Caliente SemiDensa-19; En cuatro mezclas las cuales se reemplazó un 30% y 60% por agregados reciclados en su fracción fina y gruesa respectivamente y la quinta fue una mezcla convencional, por

---

<sup>9</sup> V. Antunes , A. C. Freire, L. Quaresma, R. Micaelo, "Evaluation of waste materials as alternative sources of filler in asphalt mixtures"

<sup>10</sup> ACOSTA, D. MOLL, R., y GONZÁLES, G. "Influencia de la utilización de RCD como árido en mezclas asfálticas en caliente. En: Revista de Arquitectura e ingeniería". Vol.; 11. No 1 ISSN 1990-8830/RNPS 2125; P. 1-14

último se realizó una comprobación de los dos tipos de mezcla con los parámetros obtenidos al ensayar sus propiedades mecánicas.

Dando como conclusión que este material fue viable para su uso en Cuba, el uso de RCD en su fracción gruesa afecta positivamente propiedades como el porcentaje de vacíos en agregados y en la mezcla asfáltica, disminución de la densidad de la mezcla asfáltica al sustituir el Agregado Convencional con el RCD, la tracción indirecta de la mezcla no presentó una variación significativa al usar RCD.

Los autores Barrera y Olmedo<sup>11</sup>, los cuales trabajaron en la ciudad colombiana de Santiago de Cali, reportaron una situación de importante impacto ambiental por el indebido manejo de los llamados “escombros”, dando así la oportunidad de generar conciencia ecológica enfocada al reciclaje y reutilización de gran volumen de escombros. El trabajo de investigación tuvo múltiples objetivos: Se propuso darle un uso ingenieril para la construcción de pavimentos para lo cual se debe realizar una caracterización de los RCD, además de estudiar el comportamiento mecánico de los RCD tomando como base parámetros de resistencia y deformabilidad al añadir materiales cementantes y por último siguiendo las especificaciones del Instituto Nacional de Vías verificaron la viabilidad de usar los RCD para material de Base o sub-base en una estructura de pavimento.

Concluyendo que: El material proveniente de la ciudad de Cali presentó características que no satisfacen del todo los mínimos establecidos para el Instituto Nacional de Vías INVIAS para su utilización en capas de base y sub-base, sin embargo esto no quiere decir que el material haya sido inaceptable en una estructura de pavimento. Fue posible evidenciar que el comportamiento del RCD puede ser altamente influenciado por la adición de materiales cementantes presentando una relación proporcional del aumento en el CBR con respecto al incremento de material cementante, de la misma forma con el UCS (ensayo de compresión confinada) que también presenta un incremento en función del material cementante añadido. Fue posible evidenciar en los objetivos de la investigación de Barrera y Olmedo la utilidad para el presente trabajo de investigación debido a que determinaron varios parámetros del comportamiento mecánico de los RCD además de analizar su potencial uso con propósitos Ingenieriles, convirtiéndolo en un punto de referencia local.

Rodríguez<sup>12</sup> determinó la posibilidad de fabricar mezclas bituminosas en caliente para base de firmes de carreteras con material reciclado proveniente de RCD de

---

<sup>11</sup> BARRERA, Edward y OLMEDO, Omar. “Utilización de residuos de construcción y demolición (RCD) ligados con materiales cementantes en pavimentos”. Santiago de Cali, 2015, 87p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil.

<sup>12</sup> RODRÍGUEZ, Ana. “Sensibilidad al agua y propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con agregados reciclados de residuos de construcción y demolición”. A Coruña, 2013, 343. Trabajo de grado (Doctoral). Universidad da Coruña. Escuela técnica superior de

tipo concreto analizando la sensibilidad de estas mezclas elaboradas con materiales reciclados ante la presencia de agua junto con sus principales propiedades mecánicas, para posteriormente compararlas con mezclas convencionales, se fabricó una mezcla asfáltica en caliente, usando Agregado Convencional y Agregado Reciclado en porcentajes de 0%, 5%, 10%, 20% y 30%.

El objetivo principal del trabajo de Rodríguez fue buscar nuevas tecnologías que permita el uso de los agregados reciclados con garantías de un funcionamiento ambiental, técnico y económico además que al mismo tiempo satisfagan los requisitos establecidos en el plan nacional integrado de residuos (PNIR) de la ciudad española de Madrid y la Directiva de marco de residuos. Pasadin, y Pérez<sup>13</sup> realizaron un estudio de laboratorio usando agregados de concreto reciclado producto de la construcción y demolición para aplicarlo a mezclas asfálticas en caliente las cuales contenían RCA (por sus siglas en inglés) en 0%, 5%, 10%, 20% y 30% reemplazando al agregado grueso natural. Se usó el diseño de mezcla Marshall y para mejorar la sensibilidad a la humedad de la mezcla, optaron por curar a los especímenes durante cuatro horas en un horno.

Los resultados indican que los HMA que tienen RCA poseen un coeficiente de abrasión de los ángeles elevado sin embargo al combinar en proporciones correctas con el AC se puede obtener un desgaste aceptable. El contenido de RCA debe ser restringido debido a que la absorción de asfalto se incrementa en función del contenido de RCA, mientras que el grosor de la película de asfalto decrece, además este incremento de la absorción de asfalto puede llevar a errores al momento de estimar los vacíos llenos de asfalto y los vacíos del agregado mineral. La estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas en caliente hechas con RCA presentaron valores altos, sin embargo la Tracción indirecta decrece en función del RCA. La mezcla asfáltica en caliente que contiene RCA presento alta rigidez y fuerte dependencia de la temperatura, por lo cual presentará problemas en climas fríos. En cuanto a la deformación permanente en contenidos hasta de 30% de RCA presento un buen grado pero en contenidos altos será más susceptible a la deformación permanente.

Gómez y Farías<sup>14</sup> realizaron un estudio del comportamiento físico –mecánico de un residuo de construcción y demolición usado en la estructura de pavimentos, situando esta problemática en la capital de Brasil; En Brasilia se producen cerca de 6000 toneladas diarias de RCD, ante este enorme volumen de producción se caracterizó estos residuos para su uso industrial demostrando su viabilidad ambiental, técnica y económica, para este fin se caracterizó física y mecánicamente,

---

ingenieros de caminos, canales y puertos. Departamento de Métodos matemáticos y de representación.

<sup>13</sup> PASADIN y PEREZ, "Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste. En: Construction and Building Materials". Vol. 43, No1 (april.2013): P 497-505

<sup>14</sup> GÓMEZ Alejandra, FARIAS Marcio. 2012. Universidad de Brasilia. Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y demolición en la estructura de pavimento.

realizando pruebas convencionales como CBR y Modulo de resiliencia dando como resultado general que el material estudiado proveniente de la demolición del estadio de Brasilia cumplió con los mínimos exigidos en las normas brasileñas. En conclusión el material RCD presento índices similares a los del material natural como la grava, con una absorción elevada debido a presencia de materiales porosos y cerámicos rojos y blancos, presento buena forma promoviendo una mejor traba de partículas, se observó que el proceso de compactación afecta directamente la distribución de los tamaños siendo más intensa en función de la energía utilizada. Al comparar el Modulo resiliente de materiales naturales como grava o triturados se observó un comportamiento similar, debido a la presencia de cemento no hidratado se presenta un incremento en el módulo de resiliencia después del proceso de curado, llegando a la estabilidad al cabo de 60 días.

Paranavithana, y Mohajerani<sup>15</sup>. Desarrollaron una investigación en la cual explican que los RCA son diferentes a los agregados naturales debido a la pasta de cemento adherida a su superficie, la alta porosidad de la pasta de cemento y otros contaminantes contribuyen a la baja densidad de la partícula, de su alta porosidad y de su gran adsorción de agua. Este artículo tiene como fin mostrar las posibles aplicaciones de los RCD como agregados gruesos (por sus siglas en español) en los concretos asfálticos, para ello se determinaron todas las propiedades volumétricas (exceptuando el porcentaje de vacíos de aire), módulo de resiliencia y valores de fluencia a dos tipos de mezclas, la mezcla tipo I se preparó únicamente con agregado natural y la mezcla tipo II contiene RCD, hicieron variar sus contenidos de bitumen. Encontrándose que las briquetas con RCD presentan densidad bulk, vacíos en los agregados, vacíos llenos de asfalto inferiores a los especímenes con agregados naturales. El módulo resiliente de la mezcla con RCA decrece al aumentar el contenido de ligante asfáltico, de igual manera fue inferior al módulo resiliente de la mezcla de control, sin embargo estuvo dentro de los límites recomendados por "The Austroads Pavement Research Group", el módulo resiliente crece en función de la energía de compactación. Aunque los resultados fueron alentadores se deben realizar muchas más investigaciones.

Muchos países ya disponen de una correcta gestión de estos residuos y por lo tanto normas para su caracterización, siendo el caso de países Europeos que producen cerca de 300 millones de toneladas, 170 millones aproximadamente en Estados Unidos y Australia con una suma de 6 millones de toneladas<sup>16</sup>, de los cuales los países Europeos como Bélgica, Holanda y Dinamarca reportaron que pueden llegar

---

<sup>15</sup> SUMEDA Paranavithana y ABBAS Mohajerani. Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. En: Resources, conservation & Recycling. Vol.48, No1 (Jul.2006); P1-12

<sup>16</sup> GOMEZ, A. y FARIAS, M. "Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y Demolición en la estructura de pavimento". En: XXVI reunión nacional de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica. 2012). p 1.

a reutilizar hasta un 75% de los RCD según Acosta, Moll y Gonzales,2017<sup>17</sup>. Si se analiza en un ámbito más cercano, la ciudad de Bogotá en los últimos años ha concentrado 20 a 30% de PIB de la construcción colombiana y con este sus residuos llegando a una cifra de 15 millones Toneladas al año<sup>18</sup>, es por eso que se han adelantado esfuerzos para el tratamiento y aplicación de los RD (residuos de demolición) en las mezclas asfálticas estudiando técnicamente la reutilización segura de los residuos sólidos resultado de la demolición de obras civiles, empleándolo como agregados en capas de pavimentos flexibles. Se realizaron ensayos de caracterización física, y mecánica de materiales convencionales y los materiales alternativos producto de la demolición de obras civiles en la ciudad.

## Marco conceptual

**Pavimentos:** Un pavimento se define como: “una estructura vial multicapa, es decir, están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales compuestas por materiales seleccionados.”<sup>19</sup> Las cuales deben tener la capacidad de soportar las cargas impuestas por diferentes factores como el tránsito vehicular y condiciones ambientales cumpliendo así con su función estructural, además de esto se busca que cumpla un objetivo funcional, ósea que el usuario experimente una sensación de seguridad y comodidad.

Los vehículos al transitar por un pavimento aplican ciertas cargas denominadas “cargas dinámicas” las cuales afectan activamente las zonas donde las capas están en contacto entre sí, generando esfuerzos cíclicos y deformaciones (Verticales, horizontales y de corte). El pavimento puede estar soportado por la subrasante natural o en su defecto una plataforma, pudiendo ser la subrasante mejorada, estabilizada o sobre un terraplén.

**Pavimento flexible:** Este es un tipo de pavimento que se encuentra conformado por una carpeta bituminosa, la cual se sustenta en capas de menor rigidez compuestas por materiales granulares no tratados o ligados, estas capas son la base y la subbase aunque en situaciones particulares de cada proyecto se puede modificar las capas según las necesidades que se tenga en la obra. Cada capa cumple con un determinado papel en la estructura del pavimento. Las capas se apoyan sobre la subrasante pudiendo ser esta natural o mejorada, esta no debe verse afectada por los esfuerzos producidos por el tráfico, lo que implica que no se debe deformar para así evitar posibles deterioros de la estructura de pavimento.

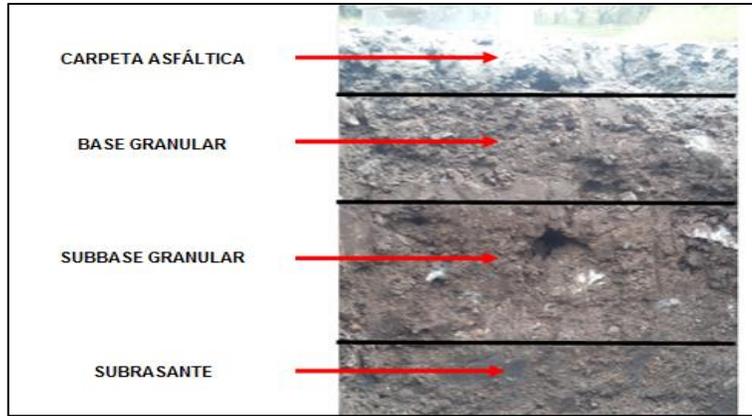
---

<sup>17</sup> ACOSTA, D. y MOLL, R. y GONZÁLES, G, op. cit, P.2.

<sup>18</sup> CASTAÑO, Jesús O., MISLE RODRÍGUEZ, Rodrigo, Andrés LASSO, Leonardo, GÓMEZ CABRERA, Adriana, OCAMPO, Manuel S., op. cit, p .122.

<sup>19</sup> QUINTANA, L y LIZCANO, f. *Pavimentos, Materiales, Construcción y Diseño*. Bogotá: Ecoe Ediciones.2015. p XXVIII.

**Figura 1. Estructura de pavimento**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

**Capa de rodadura:** “Es la capa superior del pavimento y sobre ella circulan los vehículos durante la vida útil de ésta. Debe ser resistente a la abrasión generada por el tráfico y a la agresión del medio ambiente. Tiene la función de proteger la estructura, impermeabilizando la superficie del pavimento, debe ser suave y de superficie continua para que sea cómoda la circulación de vehículos sobre ella, y debe ser rugosa para asegurar la adherencia de los vehículos.”<sup>20</sup>

**Cemento asfáltico:** Es un material aglomerante, visco-elástico y de color oscuro, que está compuesto principalmente por hidrocarburos pesados. Generalmente se lo denota como CA. Existen dos formas de clasificar un cemento asfáltico, el primero está en función de su consistencia que se mide con los ensayos de penetración y viscosidad. El segundo está en función del grado de funcionamiento o PG (*performance grade* en inglés).

En Colombia la clasificación generalmente se realiza por el ensayo de penetración (INV. E-706-13), midiendo la resistencia que experimenta el cemento asfáltico al ser penetrado por una aguja normalizada de 100 gr de masa durante un tiempo de cinco segundos a una temperatura estándar de 25 °C, esto implica que bajo las mismas condiciones de ensayo si un asfalto presenta menos penetración (evaluada en 1/0 mm) por parte de la aguja significara que este CA es de consistencia más dura, usando para esto el “Penetrómetro”. Se debe recordar que el CA es un material susceptible a la variación de temperatura, es por eso que para usarlo como ligante y obtener una correcta adherencia a los agregados pétreos se debe trabajar por lo general entre 135°C y 160 °C. “En Colombia se exige la producción industrial de

<sup>20</sup> ROPER, W y GUZMAN, A. “Caracterización físico-mecánica de los agregados pétreos en el municipio de Ocaña”. 2014. p25.

tres tipos de CA: CA 80-100(mínimo PG 58-22), CA 60-70(mínimo PG 64-22) y CA 40-50(mínimo PG 64-22)”<sup>21</sup>

**Agregado natural o convencional:** Es un material granular sólido inerte empleado en la construcción de obras civiles, se le puede o no añadir elementos activos y con granulometrías adecuadas (previo procesamiento), se pueden usar para la fabricación de elementos resistentes a esfuerzos, lo cual es logrado al realizar una mezcla con materiales aglomerantes de tipo hidráulico como cementos, cales etc. También están los aglomerantes hidrocarbonados o ligantes asfálticos. Se presenta en la **Figura 2** al agregado convencional.

**Figura 2. Agregado grueso natural.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

**Residuos de construcción y demolición:** Quiñones<sup>22</sup> se refiere a los residuos de la construcción civil procedente de construcciones, reformas, reparaciones, demoliciones de obras civiles, los cuales pueden contener ladrillos, bloques cerámicos, concreto en general, metales, rocas, maderas, morteros etc.

**Agregado reciclado:** Es un material, en este caso residuos de demolición, que se ha sometido a un proceso de transformación para su reutilización como agregado, en la **Figura 3** se presenta la fracción gruesa y fina del agregado reciclado.

---

<sup>21</sup> QUINTANA, op cit, P.3

<sup>22</sup> QUIÑONES, F.S. Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Brasília, 2014. p.6.

### Figura 3. Agregado reciclado



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

**Granulometría:** Es el proceso en el cual se puede determinar cuantitativamente las proporciones en que participan las partículas de los agregados en función de sus respectivos tamaños. “Esta identificación de los agregados se deriva de dividirlos de acuerdo con aquel que pasa o no la frontera nominal de 4,75 mm (Tamiz N°4), de acuerdo a lo estipulado en la Norma Técnica Colombiana NTC 32, Tejido de alambre y tamices para propósito de ensayo.”<sup>23</sup>

**Agregado grueso:** Se define como la porción de agregados que son retenidos en el tamiz No. 4. (4,75 mm).

**Agregado fino:** Se define como la porción de agregados que son pasantes en el tamiz No. 4. (4,75 mm) y retenido en el tamiz No. 200. (0.075mm)

**Llenante mineral (filler):** Son las partículas que tienen un diámetro inferior a 0,075 mm, también son conocidas como tamaño de arcillas, estas pueden ser utilizadas siempre y cuando no experimenten plasticidad al contacto con el agua ( $IP=0$ )

**Mezcla densa en caliente:** En Colombia se conocen como MDC o también llamadas Concreto Asfáltico, “Internacionalmente, son conocidas como HMA (Por sus siglas en inglés), presentan agregados pétreos con granulometría bien gradada y con tamaños de partículas sólidas diferentes (gravas, arenas, finos, llenante mineral), mezclados con cemento asfáltico. Estas mezclas deben fabricarse,

---

<sup>23</sup> SILVA, J, O. “Tipos de agregados y su influencia en el diseño de mezcla del concreto”. {En línea}. {13de marzo de 2015}. Disponible en: (<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto>).

extenderse y compactarse a alta temperatura (fabricarse entre 140 y 180 °C aproximadamente, dependiendo de la viscosidad del asfalto)”<sup>24</sup>

**Diseño marshall:** Su objetivo es determinar las cantidades optimas de materiales que conformaran la mezcla asfáltica, realizando para esto unas probetas que previo procesamiento sirven para “determinar la estabilidad y el flujo, como para realizar análisis de densidad y de vacíos, los cuales se aplican tanto en el diseño de las mezclas asfálticas como en la evaluación de la compactación en campo.”<sup>25</sup>

**Ensayo tracción indirecta:** En este se toma una probeta cilíndrica de la mezcla asfáltica y se le aplica compresión diametral a lo largo de dos líneas opuestas, se aplica carga de manera uniforme hasta alcanzar la rotura de la probeta.

**Caracterización:** Es un procedimiento que se realiza para poder estudiar, clasificar y analizar diferentes propiedades de un elemento (Físicas, mecánicas, químicas etc.) y de esta manera al conocer aquellos parámetros encontrar la mejor aplicación para el elemento en cuestión.

**Varianza:** Estadísticamente mide que tan dispersos se encuentran los datos obtenidos alrededor de la media.

**Anova:** El ANOVA (análisis de varianza), toma dos o más poblaciones para probar la hipótesis de que sus medias son iguales. Analizando así la importancia de uno o más factores en función de las medias, comparando la varianza entre las medias de los grupos y dentro de los grupos, para determinar si los grupos pertenecen a una población más extensa o son poblaciones con características distintas.

## **Marco teórico**

### **Composición de los residuos de demolición**

Los materiales producto de demolición tienen una gran variabilidad dependiendo de muchos factores como:

- Sistema estructural
- Sistema constructivo
- Vetustez de la estructura
- Localización
- Sistema de demolición
- Entre otros.

---

<sup>24</sup>QUINTANA, op cit, P.56

<sup>25</sup> INVIAS. INV-E 248-13 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando en aparato Marshall.

Los residuos están compuestos en su mayoría por residuos inorgánicos (Ver **Figura 4**) los cuales deberían generar una contaminación nula comparándolos a los residuos generados por las poblaciones, sin embargo estos residuos pueden contener sustancias biodegradables, tales pueden ser: I) gaseosas, que va al aire, II) lixiviados, que van a aguas superficiales y subterráneas, o III) en forma de sedimentos para los suelos<sup>26</sup>. Las ciudades presentan diferencias en el tipo de construcción dependiendo de la zona debido al uso de suelos, esto también influye en los materiales que componen los residuos.

**Figura 4. Escombros en obra (Proceso de demolición).**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

**Densidad de agregados reciclados.** Debido a que gran parte del agregado reciclado fueron agregados minerales recubiertos por pasta de cemento. Se ha demostrado que existe una relación directamente proporcional entre la disminución de la densidad del agregado y el contenido de mortero<sup>27</sup>, como se observa en la **Figuras 5**. Tomando un caso colombiano se pudo ver “que la densidad del árido reciclado oscila entre 2390-2260 Kg/m<sup>3</sup>, mientras que el árido natural presenta una densidad de 2520-2570Kg/m<sup>3</sup>”<sup>28</sup>. Por su parte la absorción aumenta en función de la cantidad de mortero adherida a las partículas, como se observa en la

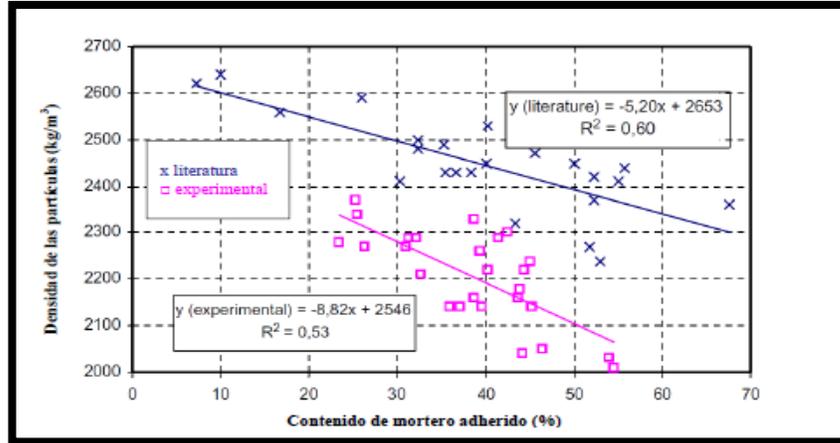
---

<sup>26</sup> E. Mejía, J. Giraldo, L. Martínez, op. cit, p.110

<sup>27</sup> RODRÍGUEZ, Ana, op. cit, P.43

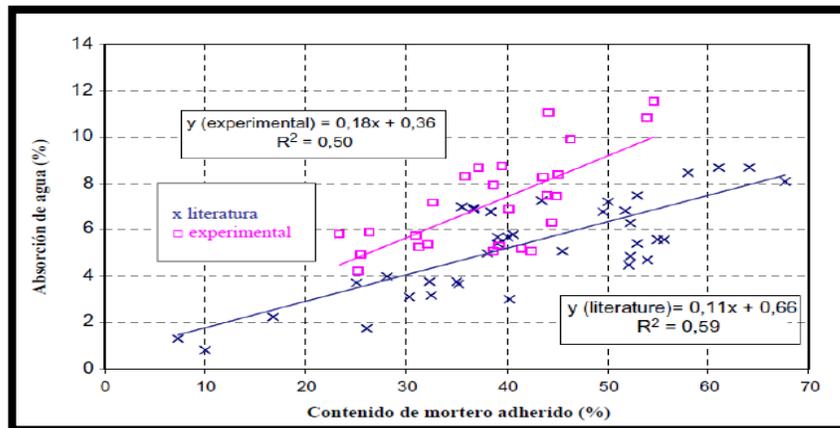
<sup>28</sup> LASSO, A & MISLE, R. Evaluación Técnica, Económica e Institucional de la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en Bogotá D.C. 2012. Pag. 35

**Figura 5. Densidad de las partículas de agregado reciclado en función del contenido de mortero adherido.**



Fuente: Sánchez de Juan y Alejandro Gutiérrez, 2009.

**Figura 6. Absorción de las partículas de agregado reciclado en función del contenido de mortero adherido**



Fuente: Sánchez de Juan y Alejandro Gutiérrez, 2009.

**Trituración.** La trituración es un proceso de transformación cuyo objetivo es reducir el tamaño de los materiales provenientes de cantera, ríos o bancos de material, el resultado son materiales libres de impurezas y clasificados por tamaños, el proceso consiste en la quiebra del material por fuerzas de compresión o impacto aplicadas a los materiales por medio de dispositivos mecánicos, dependiendo del tamaño y

tipo de material requerido puede haber diversos equipos de trituración involucrados en el proceso:

- Trituración primaria: de 12" a 4"
- Trituración secundaria: 4" a 1"
- Trituración terciaria: 1" a ¼"
- Trituración cuaternaria: ¼" a menores

Dentro de los equipos se pueden utilizar: Quebradoras de quijada, giratorias, trituradoras de cono, de rodillo, molinos de bolas, pulverizadoras, entre otros. Existen plantas de trituración las cuales pueden tener dos o más equipos de trituración y producir al tiempo agregado de diversos tamaños como se puede observar en la **Figura 7**.

**Figura 7. Planta de trituración**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

Existiendo también procesos rudimentarios de trituración como la trituración manual, la cual es poco empleada debido a los altos costos de mano de obra y los bajos rendimientos, sin embargo estos procesos al trabajar partícula a partícula produce agregados de buenas características físicas y con buena distribución de tamaños.

Normas de ensayo. En el desarrollo del proyecto se emplearon normas del instituto nacional de vías INVIAS en las cuales se encuentran descritos procedimientos, conceptos, formulas y demás tópicos necesarios para su ejecución, en la tabla 1 se encuentra un resumen de las normas de ensayo que se siguieron para la caracterización de los agregados reciclados y convencionales:

**Tabla 1. Especificaciones para caracterización de agregados**

ESPECIFICACIÓN	ENSAYO	OBJETIVO
INV-E 201	Muestreo de agregados para construcción de carreteras	Se refiere al muestreo de agregados gruesos y finos con los propósitos de investigación preliminar de la fuente de suministro, inspección de la fuente, control de operación y aceptación de los mismos.
INV-E 202	Reducción de muestras de agregados por cuarteo	La especificación describe tres procedimientos para reducir muestras voluminosas de agregados a un tamaño apropiado para los diferentes ensayos que se necesiten realizar.
INV E-213	Análisis granulométricos de agregado grueso y fino	Esta especificación tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados grueso y fino de un material, por medio de tamizado.
INV E-217	Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto	Tiene por objeto establecer el método para determinar la densidad bulk (peso unitario) de agregado fino, grueso o una mezcla de ambos, en condición suelta o compacta, y para calcular los vacíos con base en la misma determinación. El método es aplicable a materiales que tengan tamaño máximo nominal o igual a 125 mm (5").
INV E-218	Resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles	Presenta el método de ensayo para determinar la resistencia a la degradación de agregados gruesos de tamaños menores de 38 mm (1 1/2"), mediante la máquina de los Ángeles.
INV E-222	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino	Describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino (sin incluir los vacíos entre ellas), densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.
INV E-223	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso.	Describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (sin incluir los vacíos entre ellas), densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso.
INV-E 230	Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras	Describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de los índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados a emplear en la construcción de carreteras.
INV-E 238	Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro Deval	Describe el procedimiento para medir la resistencia a la abrasión de una muestra de agregado grueso utilizando el aparato Micro Deval.
INV E-240	Partículas planas y alargadas. Relación 1:5	Establece el porcentaje de partículas planas, alargadas o planas y alargadas, en un agregado grueso.
INV E-245	Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro Deval	Describe el procedimiento para medir la resistencia a la degradación por abrasión de una muestra de agregado fino utilizando el aparato Micro Deval

Fuente: Elaboración propia

Las especificaciones que se emplearon para realizar de la caracterización de mezclas asfálticas se presentan en la tabla 2:

**Tabla 2. Especificaciones para caracterización de mezclas asfálticas**

NORMA	ENSAYO	OBJETIVO
INV-E 701	Toma de muestras de materiales bituminosos	Describe el procedimiento para la toma de muestras de materiales bituminosos en los sitios de producción, almacenamiento o entrega.
INV-E 725	Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta	Establece el procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico con el fin de medir la susceptibilidad al agua sobre la resistencia a tracción indirecta.
INV-E 732	Extracción cuantitativa de asfalto en mezclas para pavimentos	Describe el procedimiento para determinar de manera cuantitativa el contenido de asfalto en mezclas asfálticas densas en caliente y en muestras tomadas de pavimentos.
INV-E 733	Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos	Este método se refiere a la determinación de la gravedad específica bulk y la densidad de especímenes de mezclas asfálticas compactadas.
INV E - 744	Espesor o altura de especímenes compactados de mezclas asfálticas	Describe el procedimiento para la toma de la altura de probetas de asfalto compactadas en laboratorio, el método varía dependiendo de las características de la misma.
INV E-748	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall	Describe el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes de mezclas asfálticas para pavimentación. Los especímenes, de forma cilíndrica y de 102 mm (4") de diámetro, son sometidos a carga en dirección perpendicular a su eje cilíndrico empleando el aparato Marshall.
INV E-782	Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas	Describe el procedimiento para obtener la granulometría de los agregados gruesos y finos extraídos de probetas de la mezcla asfáltica.
INV E-799	Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en Caliente	Proporciona los procedimientos para llevar a cabo el análisis volumétrico de especímenes de mezcla asfáltica en caliente, como volumen de aire, vacío en el agregado mineral, vacíos llenos de asfalto entre otros.

**Fuente:** Elaboración propia

## 1. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En este capítulo se realiza una descripción de los materiales que se emplearon en el desarrollo del proyecto de investigación, su origen y procesos de transformación, así como también se describe la metodología que se empleó en el desarrollo de los ensayos tanto para agregados como a las probetas de mezcla asfáltica, es necesario aclarar que en Colombia no existen especificaciones para la evaluación de las propiedades de materiales alternativos provenientes de escombros, sin embargo se buscó comparar sus propiedades con materiales convencionales.

### 1.1. MATERIALES

Los materiales que se emplearon en el desarrollo del proyecto fueron:

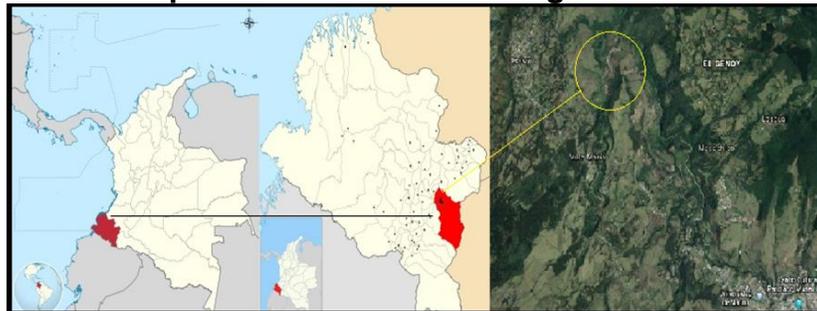
- Agregado natural o convencional
- Agregado reciclado
- Asfalto CA 80-100

En los siguientes literales se realiza una descripción de cada material, su origen, los procesos de obtención y transformación.

#### 1.1.1. Agregado natural o convencional.

El agregado pétreo que se trabajó en el presente trabajo de investigación fue tomado de una explotación minera a cielo abierto de tipo cantera, denominada cantera la vega, ubicada en la vereda Briceño bajo, corregimiento de Mapachico del municipio de San Juan de Pasto. Ver **Figura 8**.

**Figura 8. Ubicación espacial de la cantera la Vega.**



**Fuente:** Vinculo Externo, <https://www.google.com/maps/@1.2687006,-77.3201428,18z>.

**Origen:** Tomando como lineamiento base la plancha 429 de Ingeominas (Instituto Colombiano de Geología y Minería) en las cuales se determinó las estructuras geológicas de la zona referente al lugar de explotación de los agregados pétreos. Se observó que la mayoría de rocas existentes alrededor de la zona de explotación son rocas de origen Ígneo lo cual tiene mucho sentido debido a que el departamento de Nariño se encuentra ubicado justo sobre la zona de subducción de la placa oceánica de Nazca y la placa continental sudamericana<sup>29</sup>, creando así la topografía agreste y la gran presencia de materiales de origen magmático, aunque también es posible encontrar rocas del tipo sedimentario como serían los depósitos coluviales y aluviales. Por lo citado anteriormente se pudo decir que los materiales pétreos provenientes de la cantera la vega, a una escala geológica poseen características deseables para ser aplicadas a las mezclas asfálticas.

**Figura 9. Señalización de la geología presente cerca de la cantera**



**Fuente:** Vinculo externo, <https://www.google.com/maps/@1.2687006,-77.3201428,18z>. Instituto Colombiano de Geología y Minería, plancha 429.

**Producción:** Para una correcta explotación de recursos minerales y para garantizar la máxima seguridad brindando una óptima velocidad de extracción de agregados bajo las condiciones geológicas presentes en el depósito de roca, han optado en este caso por una explotación sin el uso de explosivos, utilizando maquinaria pesada, este sistema presenta la ventaja de producir elementos con un tamaño y geometría adecuada para que previamente procesado se disponga de amplia variedad de tamaños.

**Trituración:** El flujo de trituración inicia después del transporte interno del material proveniente de la extracción del banco de roca, los vehículos alimentan al triturador primario de quijadas, posteriormente el material sometido al proceso de trituración es cribado e inicia su nueva trituración (trituración secundaria) y así sucesivamente. De esta manera la cantera la “Vega” ofrece su gamma de tamaños comerciales de

<sup>29</sup> ARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. K., Y TASA, D.” Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física”. 2005, 58 p

agregado grueso desde dos pulgadas (2”) denominado grava, además de agregado fino (4.75 mm) y llenante mineral.

**Forma y textura:** Los diferentes procesos de trituración de minerales pétreos tienden a producir un agregado con condiciones geométricas especiales, en el caso de la cantera “La Vega” y de los procesos de trituración allí implantados, el agregado pétreo presentó a priori características deseables en cuanto a su utilización como materia prima según el Instituto Nacional de vías<sup>30</sup>.

### 1.1.2. Agregados reciclado.

Se extrajo el material producto de demolición de la “Escombrera Santander” ubicada en el corregimiento de Obonuco, Municipio de San Juan de Pasto. Ver **Figura 10**. La escombrera Santander es una de las más grandes y de fácil acceso, razón por la cual muchos de los residuos de construcción producidos en la ciudad son depositados en este lugar, además esta escombrera cuenta con certificación para operar emitida por Corponariño, la escombrera realiza también un proceso de selección de materiales, este último fue uno de los principales criterios al momento de la selección del lugar.

**Figura 10. Escombrera Santander**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

La “Escombrera Santander” es un punto de acopio para los “escombros” producidos en la ciudad de San Juan de Pasto y sectores circundantes, en ella se depositan diariamente cientos de toneladas de materiales de desecho producto de construcción y/o demolición de obras civiles, estos escombros presentaron una alta heterogeneidad siendo causado por las imposibilidades físicas al momento de la

---

<sup>30</sup> INVIAS <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>

demolición además de los métodos constructivos (actuales y pasados) en la ciudad de San Juan de Pasto.

Debido a que no existe en Nariño una metodología que describa procesos para su correcta disposición y futuro aprovechamiento, los escombros se ven mezclados con materiales no aptos para su reutilización desaprovechando su potencial, aunque en la escombrera se han realizado esfuerzos para implementar un proceso de separación (ver **Figura 11-A**) de residuos de concreto, no es del todo eficiente, donde se evidenció alto contenido de materiales cerámicos y mampuestos (ver **Figura 11-B**), otros materiales como el yeso, madera o metales se encontraron en un porción reducida.

**Figura 11. Escombros A) Sitio de depósito. B) Almacenamiento en laboratorio.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

**Clasificación:** Para la presente investigación se escogió residuos de construcción y demolición descritos en la tabla 3, tomada de la guía para la elaboración del plan de gestión integral de los residuos de construcción y demolición (RCD) en obra<sup>31</sup> en la cual se definió a los residuos dentro de un grupo que representa el origen general del material y una clase que representa la naturaleza del elemento:

<sup>31</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA. Guía para la elaboración del plan de gestión integral de los residuos de construcción y demolición (RCD) en obra. Bogotá. 2014

**Tabla 3. Clasificación de residuos de construcción y demolición- RCD**

CATEGORÍA	GRUPO	CLASE	COMPONENTES
RCD APROVECHABLE	I-Residuos comunes inertes mezclados	1. Residuos pétreos	Concretos, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca, baldosín, mortero y materiales inertes que no sobrepasen el tamiz # 200 de granulometría.
	II-Residuos comunes inertes de material fino	1. Residuos finos no expansivos	Arcillas (caolín), limos y residuos inertes, poco o no plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz # 200 de granulometría.

**Fuente:** guía para la elaboración del plan de gestión integral de los residuos de construcción y demolición (rcd) en obra. Bogotá. 2014

**Trituración:** Por las condiciones del material y los recursos disponibles en el laboratorio, los autores tomaron la decisión de realizar una trituración manual utilizando herramientas como maceta y demás equipo misceláneo, tratando de simular una trituración terciaria con una trituradora de impacto, debido a que estas máquinas tienden a proporcionar granulometrías con buena distribución de tamaños y elementos con buena forma, en la **Figura 12** se presenta el proceso de trituración manual. Después de pasar por el proceso de trituración el residuo de demolición paso a ser denominado agregado reciclado (AR).

Aunque se planteó usar la máquina de los Ángeles para el proceso de trituración, se abortó la idea debido a que los materiales triturados mediante dispositivos similares tienden a presentar formas redondeadas y texturas más lisas al estar sometidas a la carga abrasiva con la que trabaja el dispositivo, lo que podría afectar su desempeño en la mezcla asfáltica.

**Figura 12. Proceso de trituración y separación del material**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

**Forma y textura:** Obtenido el nuevo agregado reciclado (AR), se observó que posee una forma angular con bastantes caras fracturadas, la presencia de partículas aplanas y/o alargadas fue de un orden muy baja, casi pudiéndose decir que no presenta.

La textura de los granos de agregados reciclados es una característica de gran importancia para su desempeño como parte de una mezcla asfáltica, para empezar el AR presento varias de las características de un agregado convencional, además del alto contenido de mortero adherido a su superficie, dándole al AR una textura superficial áspera. Como se presenta en la **Figura 13**.

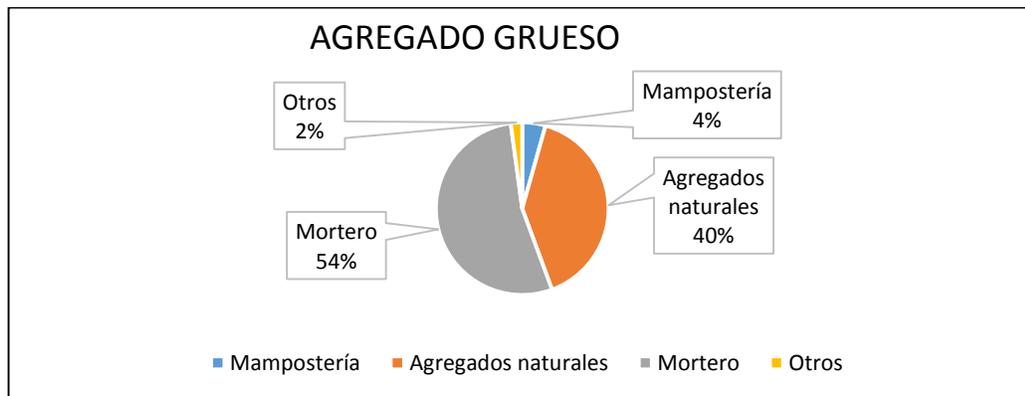
**Figura 13. Superficies de las partículas de los agregados.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

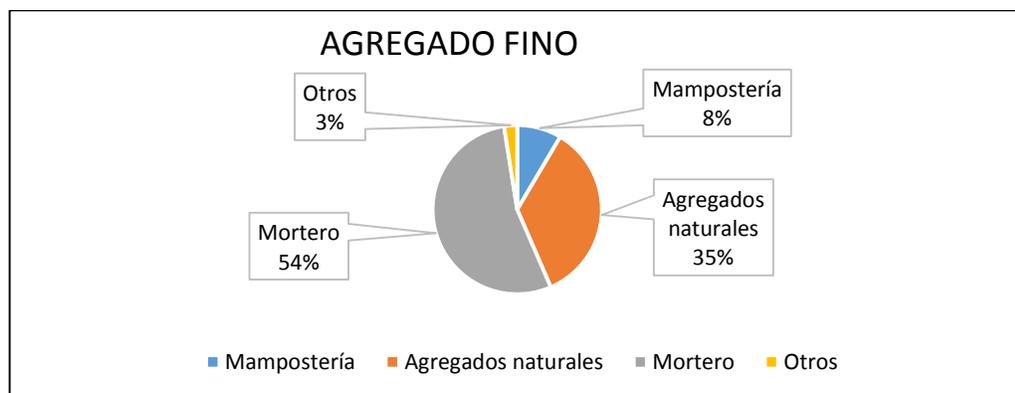
**Composición:** Generalmente el contenido de los “escombros” fue variado, se encontró materiales tales como concretos (agregado mineral recubierto por pasta de cemento), ladrillos, productos cerámicos, madera, yeso, metales y otros. Con el fin de determinar el tipo de partículas que componían el agregado reciclado con el cual se trabajó, se realizó un análisis tanto en agregados gruesos como en agregados finos. Ver **Figura 14** y **15**; Para agregados gruesos se trabajó separando las partículas y pesando cada fracción, no obstante este proceso no fue viable para el agregado fino debido al tamaño de las partículas, para estas se tomó una fracción del material retenido en el tamiz número 10.

**Figura 14. Distribución de elementos que conforman el agregado grueso**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 15. Distribución de elementos que conforman el agregado fino**



Fuente: Elaboración propia

### 1.1.3. Asfalto.

El asfalto que se usó en el desarrollo del proyecto provino de la refinería Humberto Quintero y facturado por la empresa ASFACON SP. En la Tabla 4 se presentan las principales características del asfalto, las cuales cumplen con los requisitos para la fabricación de mezclas asfálticas. Para la ciudad de pasto, normalmente se utiliza un cemento asfáltico de penetración 80/100 debido a la temperatura máxima media anual ambiente de 16.6°C<sup>32</sup>, según los requisitos del INVIAS.

**Tabla 4. Resumen de las características del asfalto 80/100.**

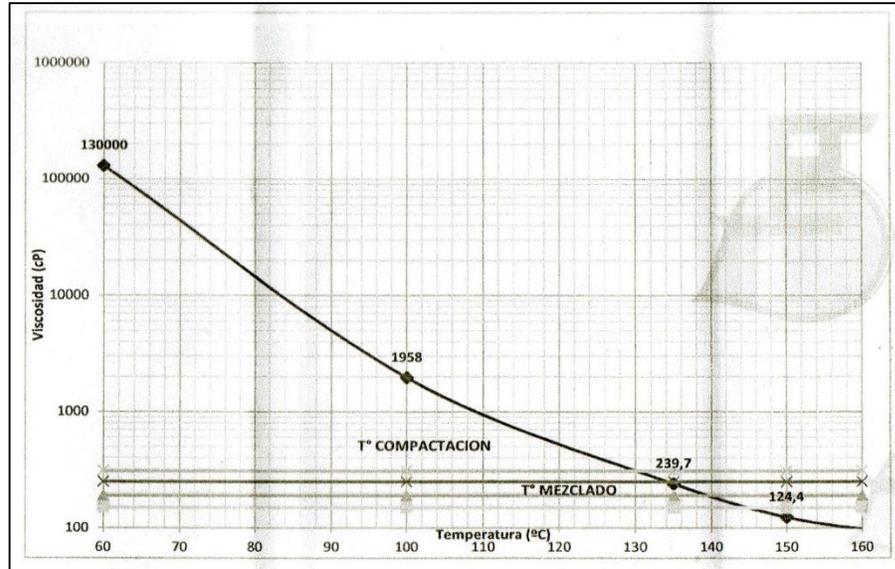
CARACTERÍSTICA	UNIDADES	ESPECIFICACIÓN	ASFALTO 80-100		RESULTADOS
			MIN	MAX	
Penetración (25°C, 100g, 5 s)	0.1 mm	E-706	80	100	90,8
Punto de ablandamiento	°C	E-712	45	52	45.2
Índice de penetración	-	E-724	-1.2	0.6	-1.02
Viscosidad Absoluta	P	E-717	1000	-	1300
Ductilidad a 25°C	cm	E-702	100	-	>100
Solubilidad en tricloroetileno	%	E704	99	-	99.62
Peso Específico 25°C	kg/m <sup>3</sup>	E-707	-	-	1031,72
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	0
Punto de ignición mediante la copa abierta de Cleveland	°C	E-709	230	-	270
Contenido de Parafinas	%	E-718	-	3	1.8
Grado de desempeño PG asfalto original 80/100	°C	AASHTO M320	58	-22	58-22

**Fuente:** Asfacon Sp

Con la curva de viscosidad (ver **Figura 16**) del cemento asfáltico, se determinaron las temperaturas de mezcla y compactación (Ver tabla 5), estos datos son indispensables para la elaboración de los especímenes bajo el método empleado en el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica.

<sup>32</sup> IDEAM. Promedios climatológicos 1981-2010. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima?fbclid=IwAR2rIBTkqT7u-Oyhldc-Kqn2e18ybACXUCfdUAvyknyszX3-YHsoH5XUkMNA>

**Figura 16. Curva de viscosidad en función de la temperatura del asfalto.**



Fuente: ASFACON SP.

**Tabla 5. Temperaturas de mezcla y compactación.**

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	ESPECIFICACIÓN	ASFALTO 80-100		RESULTADOS
			MIN	MAX	
Temperatura de mezcla	°C	ASTM D 2493	REPORTAR		144-150
Temperatura de compactación	°C	ASTM D 2493	REPORTAR		134-138

Fuente: ASFACON SP.

Adicionalmente se calculó el módulo dinámico del asfalto (SBIT), con el fin de tener un mayor conocimiento sobre las características del bitumen. Esto se realizó mediante el uso de BANDS 2.0, software de uso libre y ampliamente aceptado para este tipo de análisis, en la **Figura 17** se presenta los resultados del software.

Figura 17. SBIT. Módulo dinámico del asfalto calculado con BANDS 2.0

**Bitumen Stiffness (SBIT) : 1**

**Select Calculation Method**

- Softening Point (T800Pen) and Penetration Index
- Softening Point (T800Pen) and Penetration with Temperature
- Use 2 x Penetration with Temperature
- Penetration with Temperature and Penetration Index

**Input Parameters**

Parameter	Unit	Range	From	To	Step
Time of Loading	Seconds	<input type="checkbox"/> ?	.02		
Bitumen Temp.	°C	<input type="checkbox"/> ?	25		
Penetration Index	-	<input type="checkbox"/> ?	-1.02		
Pen Value	0.1mm	<input type="checkbox"/> ?	90.8		
Pen Temp.	°C		25		

**Results**

Bitumen Stiffness	MPa	5,290
Softening Point	°C	45,2

Results Table   Results Report   Help   Cancel

Fuente: Elaboración propia

## 1.2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Se describen los procesos realizados para la caracterización de los agregados convencionales y reciclados, siguiendo los parámetros de ensayo del instituto nacional de vías. INVIAS.

**1.2.1. Muestreo y reducción.** Para una correcta elaboración de los ensayos de caracterización de los agregados destinados a la fabricación de mezclas asfálticas, se debe en primer lugar contar con una muestra que sea representativa, que indique la verdadera naturaleza y las características reales del material a utilizar. Para este fin se tomó como guía al del Instituto Nacional de vías (INVIAS), aplicando la especificación INV E-201-13. El procedimiento fue de muestreo en pila (ver **Figura 18**), tomando porciones de material en tres lugares diferentes de la pila para evitar posibles sesgos en los resultados producto de la segregación en la pila, se tomaron aproximadamente dos metros cúbicos de material producto de demolición procedentes de la cantera “La Vega” y la escombrera “Santander”.

**Figura 18. (A) Pila de material convencional (B) Pila de residuos de construcción.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

Para la elaboración de los diferentes ensayos propuestos se debe tener cantidades reducidas de agregado, pero que continúen siendo representativas, por lo tanto se siguió la metodología descrita en la especificación INV E-202-13, ver **Figura 19** usando el método A (Cuarteador Mecánico, el cual es apto para mezcla de agregados gruesos y finos).

**Figura 19. Cuarteador mecánico.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

### 1.2.2. Caracterización física

**Gradación:** Para evitar diferencias en los resultados que se pudieran presentar por la distribución de tamaños, se planteó generar la granulometría en laboratorio y lograr así que el material se encuentre en el centro de la especificación propuesta en el artículo ART 450-13 del INVIAS, para esto se tomaron los siguientes tamices (ver **Figura 20 A**):  $\frac{3}{4}$ " ( 19 mm),  $\frac{1}{2}$ " (12.5 mm),  $\frac{3}{8}$ " (9.5 mm), No.4 (4.75 mm), No. 10 (2.00 mm), No. 40 (0.425 mm), No. 80 (0.180 mm), No. 200 ( 0.075 mm) y se separó grandes cantidades del material para cada tamiz como se muestra en la **Figura 20 B**, siguiendo el procedimiento para tamizado descrito en la especificación INV E-213-13 del INVIAS, posteriormente se dispuso las cantidades de material para lograr una distribución exacta de tamaños.

**Figura 20. (A) Serie de tamices (B) Material separado por tamaños**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

**Adhesividad al ligante asfáltico.** Aunque dentro de la reglamentación colombiana existe especificaciones que describen procedimientos para poder determinar adhesividad entre ligante y agregado, el equipo planteó aplicar una especificación internacional para este fin, la cual con un procedimiento más simple permite observar de una manera práctica y directa este parámetro, la reglamentación que describe este procedimiento fue emitida por el Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Brasil) y la especificación correspondiente es DNER-ME 078 (94).

Para el ensayo se trabajó con 500 gr de material, tanto reciclado como convencional, a este se le adicionó 17.5g de cemento asfáltico, se buscó recubrir todas las partículas de manera homogénea, lo anterior se realizó con el agregado a 100°C y el cemento asfáltico a 120°C, esta mezcla se dejó en un baño maría por 72 horas a 40°C, al finalizar el ensayo se retiró el material y se buscó determinar si hay adhesividad entre partículas o si el asfalto se desprendió de ellas (**Figura 21**).

**Figura 21. Ensayo de adhesividad (A) Agregado reciclado. (B) Agregado convencional.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

**1.2.3. Resistencia mecánica.** Resistencia a la degradación de los agregados por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles. Se siguió lo especificado en INV E-218-13 de INVIAS, se tomaron 5000  $\pm$  10 gramos de muestra distribuidos en los tamices 1/2" (12.5mm) y 3/8" (9.5mm), lo anterior se hizo tanto al agregado convencional como al reciclado y se tomó la granulometría tipo B por ser la más adecuada respecto a la adoptada del artículo ART 450-13 de INVIAS, este material se introdujo a la maquina con once esferas que dan una carga abrasiva de 4584  $\pm$  15 gr. Ver **Figura 22**.

**Figura 22. Procedimiento para el ensayo de desgaste en máquina de los ángeles.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

El desgaste se determinó mediante el uso de la siguiente relación:

$$\% \text{ Perdidas} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

Dónde:

P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo [g]

P2: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre el tamiz No.12 [g]

**Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato micro-deval.** El proceso para la determinación de la resistencia a la degradación utilizando el aparato micro-deval está normalizado por el INVIAS, siguiendo la especificación INV E-238-13 donde se describen los procedimientos para su correcta ejecución, se realizó el procedimiento de manera análoga tanto para agregado convencional como al agregado reciclado. Se utilizaron 1500 gramos y debido a que el tamaño máximo nominal de agregado grueso es ½" (12.5 mm) se empleó la granulometría mostrada en la especificación INV E-238-13, en función de la granulometría se hace 10500 +- 100 revoluciones. El procedimiento se realizó empleando un recipiente de cierre hermético dentro del cual se introdujo el agregado y una carga abrasiva de 5kg (esferas metálicas magnéticas) con dos litros de agua, esto se montó sobre un equipo con rodillos que hicieron girar el recipiente. Ver **Figura 23**.

**Figura 23. Equipo micro-deval para ensayo de desgaste.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

Para la determinación de desgaste se aplicó la siguiente relación:

$$\text{Porcentaje de perdidas} = \frac{A - B}{A} * 100$$

Dónde:

A: Masa de la muestra antes del ensayo

B: Masa de la muestra lavada sobre el tamiz #16 (1.19mm) y seca al horno luego del ensayo.

**Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión utilizando el aparato micro-deval.** El procedimiento está estandarizado por el ensayo INV E-245-13 de INVIAS, en el procedimiento se tomaron 500 gr de material con una granulometría normalizada, se utilizaron 1250 +- 5 gramos de esferas de acero como carga abrasiva y se la hace rotar 1500 +- 10 veces utilizando el equipo micro-deval. Ver **Figura 24.**

**Figura 24. Procedimiento para determinar el desgaste de agregados finos en micro-deval**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

Una vez terminado el tiempo de rotación se retiró la muestra del dispositivo, para la determinación de desgaste se realizó el procedimiento descrito en la especificación INV-E 214-13<sup>33</sup>, la cual expone el procedimiento para determinar las partículas pasantes del tamiz 200, posterior al procedimiento se seca la muestra en horno y se calculó el desgaste con la siguiente relación:

$$\text{Porcentaje de perdidas} = \frac{A - B}{A} * 100$$

Dónde:

A: Masa de la muestra antes del ensayo

B: Masa de la muestra lavada sobre el tamiz #200 y seca al horno luego del ensayo.

**1.2.4. Forma de las partículas.** Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras. Este procedimiento se desarrolló siguiendo el ensayo INV E-230-13 de INVIAS, realizando el procedimiento de la misma forma para agregados convencionales y reciclados, para el ensayo se separaron los materiales en fracciones por tamaños, posteriormente y con el uso de una regla se realiza la medición de las partículas una a una. (**Figura 25**)

**Figura 25. Procedimiento para determinar el índice de aplanamiento y alargamiento de las partículas.**



Fuente: Registro Fotográfico, Nelson Villota.

<sup>33</sup> INVIAS. INV-E 214-13 Determinación de la cantidad que pasa el tamiz No. 200 en los agregados pétreos mediante lavado.

Posterior a la separación de partículas se determinaron los índices como se muestra a continuación:

$$IAp = \frac{Mi}{Ri} * 100$$

$$IA = \frac{M3}{M1o M2} * 100$$

Dónde:

IAp: Índice de aplanamiento de la fracción di/D.

Ri: Masa de la fracción di/D.

Mi: Masa de las partículas planas de la fracción di/D.

IA: Índice de aplanamiento global.

M1 o M2: Masa total de la muestra empleada en la determinación del índice de aplanamiento.

M3: Masa de todas las partículas que pasaron las barras de los tamices o las ranuras del calibrador de aplanamiento.

**Partículas planas y alargadas relación 1:5.** Se realizó el procedimiento siguiendo los parámetros descritos en la especificación INV-E 240-13, el procedimiento se realizó de la misma forma para agregado convencional y reciclado, en el ensayo se utilizó un calibrador en el cual se mide la relación entre dimensiones partícula a partícula, el artículo ART 450-13 limita el valor de las partículas en relación 1:5, lo anterior se realizó contando el número de partículas, utilizando el método A descrito en la especificación y reportando el porcentaje, en la **Figura 26** se presenta el procedimiento seguido.

**Figura 26. Procedimiento para determinar partículas planas y alargadas.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

**1.2.5. Relaciones masa- volumen.** Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto. El procedimiento se realizó de acuerdo a la especificación INV E-217-13 del INVIAS (**Figura 27**). Se aplicó de la misma forma para agregado convencional y reciclado en estados suelto y compacto, tanto para sus fracciones gruesa y fina ya que la especificación contempla procedimiento para cada uno, los cálculos se realizaron siguiendo las siguientes relaciones:

$$M = \frac{G - T}{V}$$

$$\% \text{ Vacios} = \frac{(Sxp_w) - M}{Sxp_w} \times 100$$

Dónde:

M: Densidad bulk del agregado

G: Masa del agregado más el recipiente de medida

T: Masa del recipiente de medida

V: Volumen del recipiente de medida

S: Gravedad específica bulk calculada con INV-E 222-13

$p_w$ : Densidad del agua 988kg/m<sup>3</sup>

**Figura 27. Procedimiento para determinar densidad bulk de agregado grueso.**

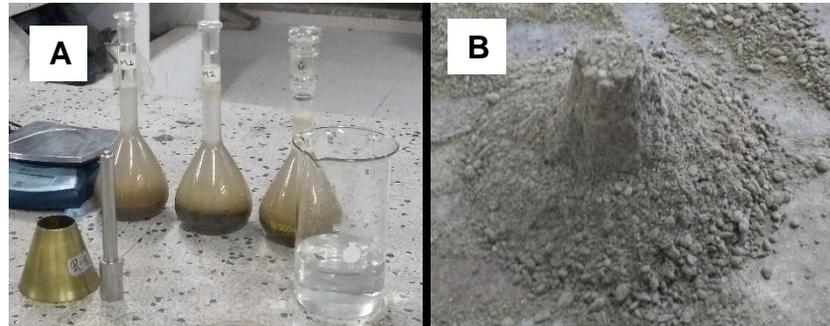


Fuente: Registro Fotográfico, Nelson Villota.

**Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino.** El procedimiento se realizó siguiendo el ensayo INV-E 222-13<sup>34</sup> tanto para agregados naturales como reciclados se usó el procedimiento gravimétrico, para esto se utilizó un picnómetro de 500 ml (**Figura 28 A**), para la correcta extracción de las burbujas de aire fue sometido a un baño térmico de agua. El procedimiento exige trabajar con la muestra en estado saturado superficialmente seco “SSS”. (**Figura 28 B**)

<sup>34</sup> INVIAS. INV-E 222-13 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino.

**Figura 28. Procedimiento para la determinación de gravedad específica de agregado fino.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

Para la determinación de las relaciones se utilizó las siguientes relaciones:

$$\text{Densidad relativa SH} = \frac{A}{(B + S - C)}$$

$$\text{Densidad relativa SSS} = \frac{S}{(B + S - C)}$$

$$\text{Absorción \%} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Dónde:

A: Masa al aire de la muestra seca al horno.

B: Masa del picnómetro aforado lleno de agua.

C: Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua.

S: Masa de la muestra SSS añadida al frasco.

**Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso.** El procedimiento para la determinación de estas relaciones se describe en la especificación INV E-223-13<sup>35</sup> del INVIAS, este es el procedimiento aplicado para el ensayo de partículas de tamaños mayores al tamiz No. 4 (4.75 mm). De manera análoga al procedimiento descrito anteriormente, el agregado empleado en este ensayo también fue llevado al estado saturado superficialmente seco SSS. Ver **Figura 29.**

<sup>35</sup> INVIAS. INV-E 223-13 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso

**Figura 29. Montaje para determinar la gravedad específica de agregado grueso.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

Las relaciones que se emplearon para determinar estos parámetros fueron:

$$\text{Densidad relativa SH} = \frac{A}{B - C}$$
$$\text{Densidad relativa SSS} = \frac{B}{B - C}$$
$$\text{Absorción \%} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Dónde:

A: Masa al aire de la muestra seca al horno.

B: Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca.

C: Masa aparente de la muestra saturada en agua.

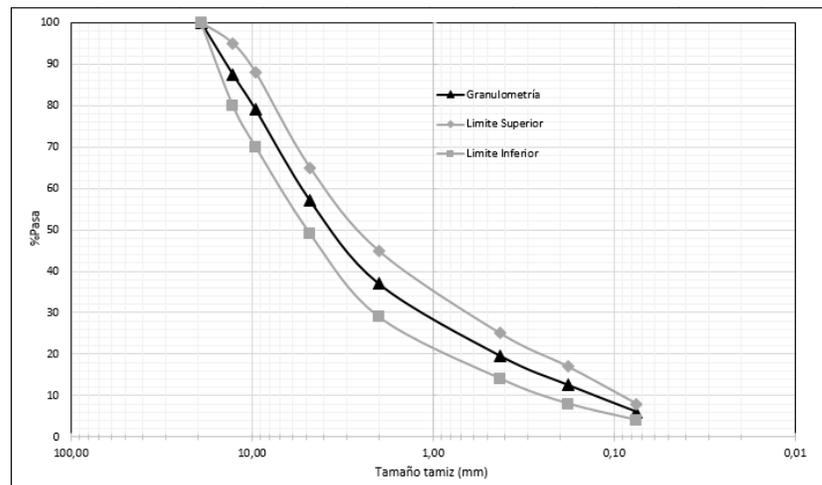
### **1.3. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

La mezcla asfáltica desarrollada con los materiales de la presente investigación corresponde a una mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19 según la clasificación presente en el artículo Art 450-13 del INVIAS.

**1.3.1. Dosificación de las mezclas asfálticas.** Se planteó la fabricación de tres mezclas, MDC-19 con agregados convencionales como la mezcla patrón, y dos mezclas con presencia de agregado reciclado, la primera con un reemplazo del 100% del agregado por material reciclado; La segunda con reemplazando el 100% del agregado grueso reciclado y fino convencional. En la **Figura 30** se presenta la

especificación granulométrica usada (franja central) para dosificación de las tres diferentes mezclas asfálticas con el fin de garantizar que las mezclas asfálticas presenten condiciones similares, En cuanto a los porcentajes de asfalto, se optó por hacer cinco puntos en los contenidos de asfalto de cada mezcla, haciendo variar para cada mezcla un 0.5 % como indica la especificaron INV-E 748-13, esto con el fin de generar un espectro más amplio en comportamiento de las propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas asfálticas y poder así determinar el contenido óptimo de asfalto. Cabe resaltar que los contenidos de asfalto fueron diferentes para cada tipo de mezcla ya que los agregados modifican el comportamiento del asfalto en la mezcla.

**Figura 30. Curva granulométrica de los agregados para la mezcla asfáltica.**



Fuente: Elaboración propia

Para la preparación de las probetas, se aplicaron los criterios de la especificación INV-E 748-13, en la cual se explica que para un molde de 2 ½" pulgadas de altura y 4" de diámetro se necesitan 1200 gramos de ingredientes entre asfalto y agregados<sup>36</sup>. Cabe resaltar que las especificaciones Invias están diseñadas para

<sup>36</sup> INVIAS. INV-E 748-13. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall. P 10

materiales de normales especificaciones, por lo cual 1200gr ocupan de una manera muy precisa el molde de  $514.81 \text{ cm}^3$ .

Sin embargo cuando se evaluaron los agregados reciclados y debido a la baja densidad de los mismos se encontró imposible utilizar el mismo molde para poder trabajar 1200 gr de materiales, por lo cual los autores decidieron en función de la granulometría presente en la tabla 450-6 del artículo 450-13 y las proporciones de agregado fino y grueso, calcular los volúmenes ocupados por estos materiales y utilizándolos para encontrar el peso a utilizar con los agregados reciclados, como se presenta en la tabla 6 y 7; Para esto se utilizó la fórmula de densidad máxima teórica de las probetas, la cual con un error muy bajo corresponde a aplicar la fórmula de densidad directamente entre el peso de materiales y el volumen del molde.

Para esto y con los datos de los agregados convencionales, se planteó teóricamente una briqueta de referencia con un contenido de asfalto de 6.0274% la cual tiene una densidad máxima teórica calculada mediante la siguiente tabla:

**Tabla 6. Densidad máxima teórica de briqueta de referencia.**

ENSAYO MARSHALL CONVENCIONAL				
ÍTEM	% (Peso)	Peso T (gr)	Densidad ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Volumen ( $\text{cm}^3$ )
	A	B=1200*A	C	D=B/C
Asfalto	6.0274%	72.33	1.03	70.22
Ag. Grueso	40.41%	484.90	2.56	189.62
Ag. Fino	47.93%	575.11	2.50	229.90
Ll. Mineral	5.64%	67.66	2.70	25.059
Briqueta	100%	1200.00	2.331	514.81

Fuente: Elaboración propia

Densidad máxima teórica:  $2.331 \text{ gr}/\text{cm}^3$

Si se aplica directamente la fórmula de densidad al peso de los agregados y volumen del molde se obtiene:

$$Densidad = \frac{1200\text{gr}}{514.81\text{cm}^3} = 2.331 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Como se observó, las densidades son las mismas, lo cual garantiza que los volúmenes de las porciones de agregados son un buen referente para realizar la correlación a los materiales reciclados, realizando los cálculos en términos de volumen como se describe en la tabla 7, se encontró:

**Tabla 7. Análisis para deducir el peso para la dosificación los materiales reciclados a partir del volumen.**

ENSAYO MARSHALL RECICLADO				
ÍTEM	% (Volumen)	Volumen T (cm <sup>3</sup> )	Densidad (gr/ cm <sup>3</sup> )	Peso T (gr)
	E	F=D*E	G	H=F*G
Asfalto	13.64%	70.22	1.03	72.33
Ag. Grueso	36.83%	189.62	1.99	372.72
Ag. Fino	44.66%	229.91	1.69	388.90
Ll. Mineral	4.87%	25.06	2.65	66.41
Briqueta	100.00%	514.81	1.75	900.36

**Fuente:** Elaboración propia

Con lo anterior se tomó la determinación de utilizar 900 gr para la elaboración de las probetas con agregados reciclados; Salvo esto, el ensayo realizo con las mismas condiciones descritas en la especificación, la dosificación se continuo realizando por peso tal cual se describe en la especificación, conservando la curva granulométrica en el centro de la franja tal cual se describe anteriormente en este documento.

**1.3.2. Método Marshall.** Con lo expresado en el literal anterior, (I) la mezcla asfáltica convencional se fabricó con 1200 gr, (II) la mezcla asfáltica con 100% de agregado reciclado se fabricó con 900 gr y (III) la mezcla asfáltica con reemplazo de 100% del agregado grueso reciclado por convencional se fabricó con 1200 gr; Salvo el peso de los materiales que componían las probetas con 100% de agregado reciclado, se siguieron todos los procedimientos estipulados en las especificaciones del Instituto nacional de vías correspondientes.

El ensayo Marshall puede variar en su procedimiento dependiendo de las condiciones de uso del concreto asfáltico, ya que el proyecto busco evaluar la viabilidad de usar agregados reciclados en mezcla asfáltica como capa de rodadura en pavimentos, se planteó evaluar la mezcla en las condiciones más críticas, es decir para el transito más alto<sup>37</sup>; El cual es un nivel de tránsito NT3, que representa un numero de ejes equivalente de 80 KN mayor o igual a 5 millones, según lo estipulado en el artículo Art 100-13 Tabla 100-1.

El proceso de dosificación se realizó de forma manual (Ver **Figura 31**), los materiales con la granulometría previamente preparada, se dispusieron en

<sup>37</sup> INVIAS. Art 100-13 INVIAS 2013 Ámbito de aplicación, términos y definiciones P2

recipientes y se calentaron hasta la temperatura de mezcla, esta fue recomendada en la caracterización del asfalto, de esta manera se llevó los agregados hasta 150°C al igual que el asfalto y se realizó el proceso de mezcla, posteriormente se realizó el proceso de compactación a la temperatura indicada, para los ensayos del rango de temperaturas recomendados, se optó por 138°C para los diferentes tipos de mezcla, para esto se utilizó un martillo mecánico aceptado por la normas con el cual se aplicó 75 golpes por cara, siguiendo los parámetros para un tránsito NT3. Finalmente se permitió a la mezcla un periodo de reposo y se almaceno las probetas para continuar su proceso.

El ensayo Marshall finaliza con la obtención para un grupo de probetas de los parámetros de Estabilidad (Carga) y Flujo (Deformación) máximas para cada una, con las cuales se realizó un promedio y posteriormente se encontró el porcentaje óptimo de la mezcla.

**Figura 31. Dosificación por el método Marshall.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

**1.3.3. Estabilidad y flujo.** Una vez fabricadas las probetas con las tres configuraciones de agregados ((I) convencional, (II) 100% reciclado y (III) 100% grueso reciclado y fino convencional) se procedió a encontrar los parámetros de resistencia de cada probeta elaborada, para garantizar que los resultados obtenidos sean representativos se hicieron 25 probetas por cada configuración de agregados,

cinco probetas por cada contenido de asfalto, en total para determinación de los parámetros de resistencia se fabricaron 75 probetas.

Por medio del método Marshall, el cual busca encontrar la carga y deformación máxima para cada una de las probetas, corroborando que la relación entre ellos se encuentre dentro de los parámetros específicos para cada tipo de tránsito, esto se logró con una prensa Marshall la cual cuenta con una celda de carga y un deformímetro como se presenta en la **Figura 32**, lo anterior siguiendo los parámetros y procedimientos descritos en la especificación INV-E 748-13<sup>38</sup>, el procedimiento se debe realizar dentro de las siguientes 24 horas al proceso de fabricación de las probetas, las cuales se sumergieron durante 30 minutos en agua a 60°C antes de ser cargadas.

**Figura 32. Ensayo Marshall.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, William Ruiz.

---

<sup>38</sup> INVIAS INV-E 748-13. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall. 2013.

**1.3.4. Parámetros volumétricos.** Los parámetros volumétricos de las probetas de asfalto se determinaron siguiendo las disposiciones de la especificación INV-E 799-13, la cual describe el procedimiento paso a paso, a continuación se presentan las ecuaciones utilizadas:

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

$$VAsf = Ps * \frac{Gmb}{Gsb}$$

$$VFA = 100 * \frac{Vasf}{VAM}$$

Dónde:

Va: Vacíos llenos de aire

Gmm: Densidad Máxima Teórica

Gmb: Densidad Real

Vasf: Volumen de asfalto

Gsb: Densidad Bulk del material

VAM: Vacíos en el Agregado Mineral

VFA: Vacíos Llenos de Asfalto

Ya que no existió una diferencia en la forma de las probetas de material convencional, 100% reciclado o 100% de reemplazo del agregado grueso reciclado y fino convencional; El procedimiento se realizó en las mismas condiciones para cada una de ellas, lo cual garantizó las condiciones para una correcta comparación; Sin embargo y debido a la porosidad del material reciclado, el tiempo en el que se estabilizó el peso para las probetas hechas con este material en la condición sumergida fue un poco más elevado.

Por otra parte, para las probetas con 100% de material reciclado y las del reemplazo del agregado grueso reciclado se encontró un error al aplicar la fórmula para calcular los vacíos llenos de aire, ya que la densidad real de la probeta supera a la densidad máxima teórica debido a determinadas condiciones que se tratarán más adelante, por lo cual fue necesario realizar una correlación diferente para poder analizar este parámetro, se presenta a continuación la relación de volúmenes que se utilizó:

$$\%VA = \frac{VG - VS}{VG}$$

Dónde:

VA: Vacíos llenos de aire

VG: Volumen geométrico

VS: Volumen sumergido

Los parámetros volumétricos de las probetas se evaluaron en diferentes momentos de la realización del proyecto:

- Ensayo Marshall agregado convencional (AC)

- Ensayo Marshall agregado reciclado (AR)
- Ensayo Marshall agregado reemplazo grueso (ARG)
- Porcentajes óptimos
- Probetas para ensayo de tracción indirecta

**1.3.5. Contenidos óptimos.** Una vez obtenidos los parámetros volumétricos y los valores de estabilidad y flujo para cada una de las probetas con las tres configuraciones de materiales para las mezclas asfálticas, se realizó el procedimiento para obtener el contenido óptimo de la mezcla, mismo que debe cumplir con los requisitos del ART 450-13 del INVIAS presentado en la tabla 8.

**Tabla 8. Requisitos de la mezcla asfáltica MDC-19 para NT3.**

CARACTERÍSTICA	ENSAYO INV	CATEGORÍA DE TRANSITO
		NT3
Compactación (Golpes/cara)	E-748	75
Estabilidad mínima (N)		9000
Flujo (mm)		2.0 a 3.5
Relación Estabilidad/ Flujo (KN/mm)		3.0 a 6.0
Vacíos con aire %	E-736	4.0 a 6.0
Vacíos en el agregado mineral %	E-799	15.0
Vacíos llenos con asfalto %		65 a 75

**Fuente:** Tabla 450-10, Art 450-13

Para la elaboración de las gráficas de los parámetros Marshall se consideró a las características que considera el artículo Art 450-13,( presentadas en la tabla 8) como variables dependientes (eje y) y a sus respectivos contenidos de asfalto como variables independientes (eje x); Una vez completadas las gráficas para sus respectivas características y para cada una de las tres configuraciones de agregados; Se ingresó en las gráficas con los valores mínimos de los parámetros y se eligió un valor para el cual se cumpla con los requisitos mínimos, siendo el principal valor para la selección los vacíos llenos con aire, el cual según la normatividad vigente tiene un límite de 15%, el siguiente criterio en orden de importancia es la estabilidad y flujo.

Posterior a la obtención de los contenidos óptimos de asfalto para cada una de las tres configuraciones de agregados, se elaboraron cuatro probetas por cada contenido óptimo, fabricando 12 probetas más.

**1.3.6. Tracción indirecta.** Para evaluar la adherencia del agregado convencional y reciclado se planteó por parte de los autores la realización del ensayo de tracción indirecta con la especificación INV-E 725-13, la cual también evaluó la afectación que realiza el agua sobre la mezcla asfáltica. Se presentan las fórmulas usadas para el cálculo de la resistencia a la tracción y la relación de resistencia a la tracción:

$$RT = \frac{2000 * P}{\pi * t * D}$$

$$RRT = 100 * \frac{RTH}{RTS}$$

Dónde:

RT: Resistencia a la tensión, Seca y Humedad respectivamente.

P: Carga Máxima.

t: Altura del espécimen inmediatamente antes de la prueba.

D: Diámetro del espécimen.

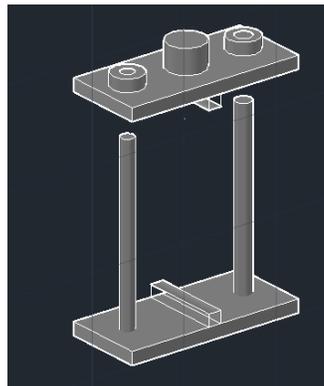
RRT: Relación de resistencia a la tensión.

RTH: Resistencia a la tracción húmeda

RTS: Resistencia a la tracción seca

Sin embargo en el laboratorio de suelos y materiales de la universidad de Nariño no existía el dispositivo para poder realizar el ensayo, razón por la cual se optó por diseñarlo y construirlo siguiendo las especificaciones que se requiere por parte de este dispositivo, mismas que se encuentran descritas en la especificación INV-E 725-13<sup>39</sup>. El dispositivo en cuestión fue dejado en las instalaciones del laboratorio de suelos y materiales para el uso de las siguientes generaciones, en la **Figura 33** se presenta un esquema tridimensional.

**Figura 33. Esquema del dispositivo para ensayo de corte directo.**



**Fuente:** Elaboración propia mediante software AutoCAD 2019. Producto Educativo de Autodesk

<sup>39</sup> INVIAS. INV-E 725-13 Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta. Lit. 4.8 Franjas de carga P3

Y el ensayo se realizó siguiendo la especificación INV 725-13 la cual no solo evalúa la resistencia al corte de una probeta de mezcla asfáltica, sino además la afectación que genera el agua sobre la misma, este ensayo requirió de dos grupos de probetas, el primer grupo se ensayó en seco, y para garantizar que los resultados fueran representativos se fabricaron tres probetas y la misma cantidad de probetas que se ensayaron en condiciones húmedas, luego de una inmersión en un baño María a 60°C durante 24 horas, esto se repitió para cada una de las tres configuraciones de agregados, dando un total de 18 probetas necesarias para la determinación de la resistencia a la tracción. Con esta prueba se observó el trabajo de los agregados en cada una de las mezclas asfálticas y la afectación que la humedad produce en el agregado, para cada una de las probetas se registró si hubo o no quiebra de partículas, de forma cualitativa este ensayo nos permite observar también la adherencia de los agregados a la mezcla asfáltica.

**1.3.7. Evaluación de quiebra de partículas.** Utilizando la especificación INV-E 732-1340 e INV-E 782-1341 se realizó la extracción de asfalto de las probetas realizadas con el contenido óptimo de agregados y material bituminoso con el fin de evaluar la quiebra de partículas en el proceso de compactación; Ya que las probetas se realizaron con una granulometría hecha fracción a fracción con los pesos exactos para cada uno de los tamices, resulta fácil observar el desplazamiento en la franja granulométrica que exige el ART 450-13 del INVIAS y comparar el cambio entre los diferentes tipos de mezcla que se desarrollaron en el proyecto, y así evaluar la quiebra de partículas y comprobar que la mezcla sigue dentro de los parámetros de la especificación.

Para tal fin, con la masa de los agregados a los que se les extrajo el asfalto se realizó nuevamente un análisis granulométrico utilizando la especificación INV-E 213-13, se dibujó una gráfica en la cual se observó la granulometría original, las franjas de la especificación y la granulometría que presentó el material después de someterse al proceso de compactación por impacto, para obtener una mejor caracterización se realizaron tres granulometrías por configuración de agregados y se obtuvo una granulometría de desgaste promedio.

---

<sup>40</sup> INVIAS. INV-E 732-13 Extracción cualitativa de asfalto en mezclas para pavimentos.

<sup>41</sup> INVIAS. INV-E 782-13 Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas Ibid.p13

## 1.4. CANTIDAD DE ENSAYOS

La cantidad de ensayos que se realizan a un material depende del nivel de confianza con el cual se quiere realizar los análisis, de manera práctica los laboratorios realizan tres repeticiones para cada prueba y de esta forma obtener un valor promedio representativo, ya que de existir una variación entre dos resultados sería imposible descartar uno de ellos, al tener tres se puede trabajar más certeza de como mínimo dos de ellos y así entre más ensayos existían.

Sin embargo y ya que no existen pruebas sobre los materiales reciclados en la ciudad de Pasto los cuales permitan tener parámetros de referencia, el equipo investigador plantea la realización de cinco repeticiones para cada uno de los ensayos a materiales reciclados, de la misma forma que para la elaboración de las mezclas asfálticas, lo cual cumple con la especificación INV-E 748-13<sup>42</sup> en la cual se especifica que si el ensayo se realiza para el diseño de una mezcla, los resultados de estabilidad y flujo deberán ser el resultado del promedio de tres especímenes para cada contenido de ligante asfáltico.

Por su parte se realizó la variación del contenido de ligante asfáltico cinco veces dependiendo de cada caso, finalmente y para los ensayos posteriores a la determinación de los porcentajes óptimos de los materiales en la mezcla se realizaron tres repeticiones, salvo que la especificación indique algo diferente.

Es importante comprender que nunca dos resultados de ensayos en las mismas condiciones arrojaran resultados iguales, ya que se pueden presentar diferentes condiciones en el proceso, estas fluctuaciones se conocen como ruido o error experimental y se trata simplemente de un error estadístico por condiciones que no pueden ser controladas por el investigador y que generalmente son inevitables<sup>43</sup>. Para evaluar la validez de los resultados obtenidos de las mezclas asfálticas y para realizar un mejor análisis de los resultados se planteó realizar un análisis de varianza ANOVA.

## 1.5. ANÁLISIS ANOVA

Para una correcta interpretación de los datos obtenidos en el transcurso de la investigación, el equipo decidió utilizar el método ANOVA (Análisis of variance) para un factor o ANOVA simple, debido a que este es el método que mejor se adapta cuando se desean comparar las medias de tres o más grupos. Se utilizó un nivel

---

<sup>42</sup> INVIAS. INV-E 748-13. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleado el equipo Marshall 2013 2p.

<sup>43</sup> MONTGOMERY C. Douglas. Diseño y análisis de experimentos. México. D.F 2004 ISBN 968-18-6156-6 20 p

alfa de significación del 0.05, las variables independientes fueron los Agregados Convencionales (AC), Agregados Reciclados (AR) y Agregados Reemplazo del Grueso (ARG).

Las variables dependientes fueron las propiedades Físico-mecánicas (Estabilidad, Flujo, Relación E/F y RRT) de las tres diferentes configuraciones de mezclas asfálticas producidas con los materiales anteriormente nombrados. Debido a que el método ANOVA trabaja comparando las medias obtenidas para la variable dependiente en cuestión, se tomó como hipótesis a negar (hipótesis nula,  $H_0$ ) que las medias de los tres materiales son iguales y por consiguiente la hipótesis alterna ( $H_1$ ) es que al menos un material presenta una media diferente

## 2. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se expone los resultados y análisis de los parámetros evaluados en la investigación, se analizó los datos obtenidos de la caracterización de agregados y las tres configuraciones de mezcla asfáltica, se expone también el desarrollo de un análisis de varianza *ANOVA simple* dando un manejo estadístico a los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio sobre las mezclas asfálticas, las cuales son el eje principal de esta investigación, finalmente se evaluó el uso de la mezcla asfáltica con agregado reciclado como capa de rodadura y se promueve el análisis sobre la posible aplicación de este material como base estabilizada con emulsión en estructuras de pavimento.

### 2.1. AGREGADOS

**Trituración.** El proceso de trituración, de la forma que se llevó a cabo para reducir la muestra a los tamaños especificados por la normatividad colombiana, presentó una serie de resultados que no deben ser pasados por alto.

En el proyecto se comparó agregados triturados de forma mecánica como se presentó en el literal 1.1.1. Con agregados reciclados triturados de forma manual como se presentó en el literal 1.1.2. Esto puede llevar a producir partículas de formas diferentes, se observó que es posible obtener nuevamente el agregado grueso original de los elementos de concreto hasta en un 40% como se mostró en el literal 1.1.2; La pasta de cemento o mortero presente alrededor de ellos se convirtió en el agregado fino:

Además en el proceso de trituración se observó que existen partículas resultantes que tienen a su alrededor una gran cantidad de mortero adherido a ellas, este mortero es material fino y poroso, y cómo se menciona en el marco teórico, uno de los responsables de disminuir la densidad además de afectar su absorción y desgaste, lo que concuerda con Chiman L, Sanabria L, Chiman A y Correa J<sup>44</sup>, quienes en su investigación concluyen que al disminuir el peso específico aumenta la absorción del agregado.

**Ensayos de caracterización.** Como resultado de la caracterización de los agregados se obtuvo los siguientes resultados:

---

<sup>44</sup> CHIMAN Larissa, SANABRIA Luis, CHIMAN Alexei, CORREA Jhon. Caracterización comparativa de agregados obtenidos de rocas ígneas usados en construcción vial. (Oct, 2014). p. 11

**Relaciones masa- volumen.** En la **tabla 9 y 10** se presenta una comparación de los valores de las relaciones masa-volumen obtenidas en el presente trabajo de investigación, donde claramente se observa que el agregado convencional con un contenido de mortero del 0% presenta valores más altos que el agregado reciclado que si presenta mortero adherido a su superficie, lo que concuerda con el análisis sobre la forma de las partículas en el proceso de trituración y lo expuesto en la **Figura 5**, la cual muestra una relación inversa entre la cantidad de mortero adherido y los valores de densidad.

**Tabla 9. Densidad bulk de los materiales.**

DENSIDAD [kg/m <sup>3</sup> ]	AGREGADO CONVENCIONAL		AGREGADO RECICLADO	
	GRUESO	FINO	GRUESO	FINO
DENSIDAD SUELTA	1451,22	1560,11	1101,40	1140,13
DENSIDAD COMPACTA	1573,44	1665,67	1250,58	1291,33

**Fuente:** Elaboración propia

La absorción de los materiales reciclados (**Ver tabla 10**) fue uno de los ensayos con mayor diferencia, este ítem presentó un incremento de 4.5 veces en comparación al material convencional, esto se puede explicar con lo expuesto en la **Figura 6**, la cual muestra una relación de proporcionalidad entre la absorción y el mortero adherido a las partículas.

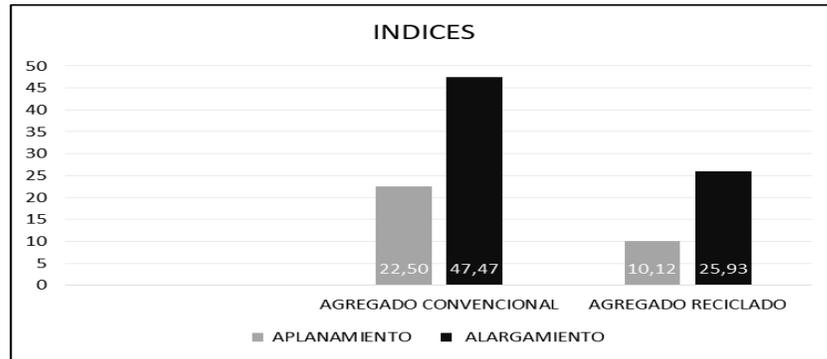
**Tabla 10. Densidad relativa, densidad relativa SSS, densidad relativa aparente y absorción.**

DENSIDADES [gr/cm <sup>3</sup> ]	AGREGADO GRUESO		AGREGADO FINO	
	CONVENCIONAL	RECICLADO	CONVENCIONAL	RECICLADO
DENSIDAD RELATIVA ( GRAVEDAD ESPECIFICA)	2,56	1,97	2,50	1,69
DENSIDAD RELATIVA SSS ( GRAVEDAD ESPECIFICA)	2,62	2,18	2,61	2,04
DENSIDAD RELATIVA APARENTE ( GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE)	2,72	2,49	2,81	2,6
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	2,39	10,82	4,41	20,6

**Fuente:** Elaboración propia

Debido a los procesos de demolición y trituración con los cuales se obtuvo el agregado reciclado, se obtuvo partículas con formas cubicas, las cuales en comparación con el material reciclado presentaron un mejor resultado en el ensayo de índices de aplanamiento y alargamiento (**Ver Figura 34**).

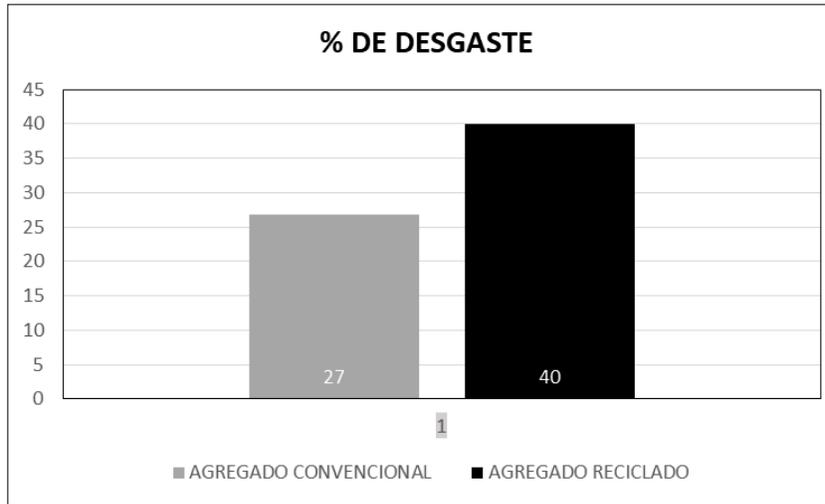
**Figura 34. Índices de aplanamiento y alargamiento.**



**Fuente:** Elaboración propia.

**Resistencia mecánica.** Se evidenció en los ensayos de desgaste valores más elevados para los materiales reciclados; Debido a la procedencia del agregado reciclado y sus múltiples procesos de reducción, el material puede presentar fatiga, lo cual influye directamente en este resultado, por su parte el mortero adherido a los agregados gruesos, presenta una naturaleza porosa, lo cual facilita la presencia de grietas<sup>45</sup>, lo anterior sumado a la baja resistencia del mortero genera un desgaste más elevado en comparación al agregado convencional (**Figura 35 y 36**).

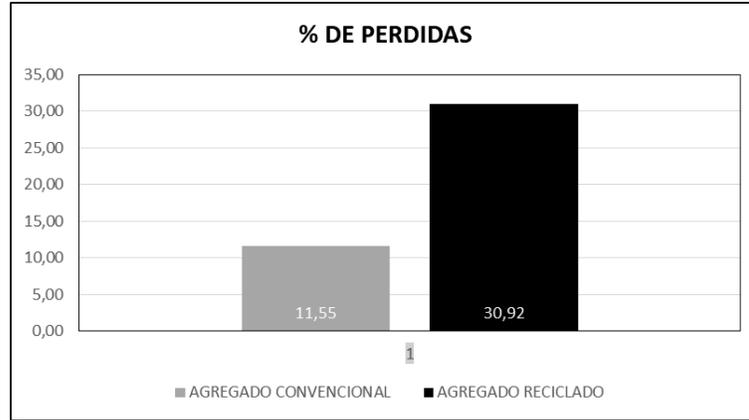
**Figura 35. Porcentaje de desgaste de los agregados en la máquina de los ángeles.**



**Fuente:** Elaboración propia

<sup>45</sup> RODRÍGUEZ Ana. Op. Cit. P 42

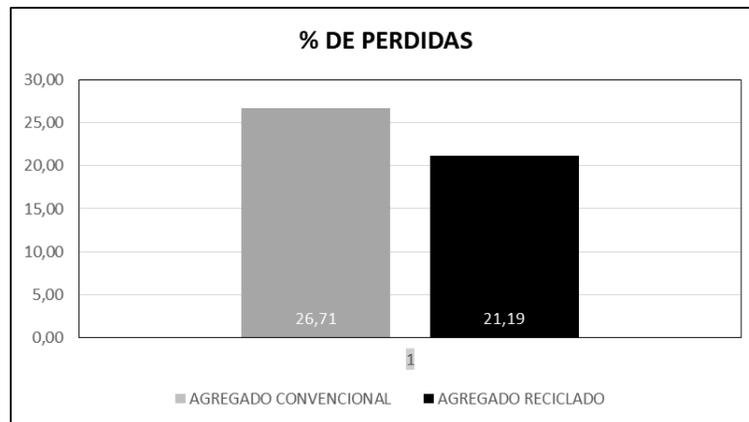
**Figura 36. Porcentaje de pérdidas de agregados gruesos en micro-deval.**



**Fuente:** Elaboración propia

Evaluando el desgaste del agregado fino mediante el equipo micro-deval, se evidenció un menor desgaste para el agregado reciclado, lo cual se puede explicar ya que en los procesos de trituración se logró partículas con formas cúbicas las cuales presentan mayor resistencia respecto a las partículas alargadas, esto se comprueba con el ensayo de índices de aplanamiento y alargamiento, para el cual el comportamiento de los agregados reciclados fue mejor.

**Figura 37. Porcentaje de pérdidas de los agregados finos en el micro deval.**



**Fuente:** Elaboración propia

**Resumen caracterización.** En **Anexo A** y **Anexo B** se presenta los datos y cálculos de cada ensayo. En las tablas 11 y 12 (agregados gruesos y finos respectivamente) se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados convencional AC y agregado reciclado AR:

**Tabla 11. Resumen de caracterización de los agregados gruesos.**

AGREGADO GRUESO					
ESPECIFICACIÓN	NOMBRE	PROPIEDAD	UNIDADES	MATERIAL	
				AC	AR
INV E-217	Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto	densidad suelta	Kg/m <sup>3</sup>	1451.2	1101.4
		densidad compacta	Kg/m <sup>3</sup>	1573.4	1250.6
		% vacíos suelta	%	43.13	43.85
		% vacíos compacta	%	38.35	36.25
INV E-218	Resistencia a la degradación de los agregados por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles	perdidas	%	26.74	40
INV E-223	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso	densidad relativa (gravedad específica)	gr/cm <sup>3</sup>	2.56	1.97
		densidad relativa SSS	gr/cm <sup>3</sup>	2.62	2.18
		densidad relativa aparente	gr/cm <sup>3</sup>	2.72	2.49
		absorción	%	2.39	10.82
INV-E 230	Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras	índice de aplanamiento global	%	22.50	10.12
		índice de alargamiento global	%	47.47	25.93
INV-E 238	Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro Deval	perdidas	%	11.55	30.92
INV E-240	Partículas planas y alargadas. Relación 1:5	plana/alargada		ni plana /ni alargada	ni plana /ni alargada

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 12. Resumen de la caracterización de agregados finos.**

AGREGADO FINO					
ESPECIFICACIÓN	NOMBRE	PROPIEDAD	UNIDADES	MATERIAL	
				AC	AR
INV E-217	Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto	densidad suelta	Kg/m <sup>3</sup>	1560.11	1140.13
		densidad compacta	Kg/m <sup>3</sup>	1665.66	1291.33
		% vacíos suelto	%	37.51	32.46
		% vacíos compacto	%	33.28	23.51
INV E-222	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino	densidad relativa (gravedad específica)	gr/cm <sup>3</sup>	2.50	1.69
		densidad relativa SSS	gr/cm <sup>3</sup>	2.61	2.04
		densidad relativa aparente	gr/cm <sup>3</sup>	2.81	2.60
		absorción	%	4.41	20.60
INV E-245	Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro Deval	perdidas	%	26.71	21.19

**Fuente:** Elaboración propia

Al tratar a los agregados reciclados como agregados convencionales se constató que existe una gran cantidad de especificaciones dentro de las cuales el agregado cumple con los parámetros y especificaciones contenidas en el ART 450-13 del INVIAS o al menos se encuentran cerca de los límites de la especificación, este es el caso de la especificación INV-E 240 en la que se encontró un 0% de partículas planas o alargadas en una relación 1:5; sin embargo existen parámetros como el de desgaste en la máquina de los ángeles, evaluada mediante la especificación INV-E 218-13, este parámetro con un valor de 40% para el agregado reciclado no cumple con el valor mínimo de 25% para capa de rodadura, sin embargo se encuentra muy cerca del valor máximo para ser utilizado como material de base, en la tabla 13 se presenta los valores obtenidos en la investigación y los rangos que presenta la normatividad colombiana:

**Tabla 13. Resultados y especificaciones de los materiales evaluados en el presente proyecto.**

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL		ESPECIFICACIÓN NT3
		AC	AR	
Dureza, agregado grueso				
Desgaste en Maquina de los Ángeles Capa: Rodadura / Intermedia / base, 500 Revoluciones	INV E-218	26.7 4	40	25 / 35 / 35
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval Capa: de : rodadura / intermedia / base	INV-E 238	11.5 5	30.9 2	20 / 25 / 25
Geometría de las partículas, agregado grueso				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1 máximo [%]	INV E-240	0	0	10

**Fuente:** Elaboración propia

Al comparar el material reciclado directamente con la especificación presentada en la norma para cada ensayo, se observó que existen parámetros fuera de los rangos, pero al comparar directamente el material reciclado con el material de referencia, se observó que el material reciclado tiene comportamientos similares, como se puede observar en el resumen de resultados presentados en la tabla 11 y 12.

## 2.2. MEZCLAS ASFÁLTICAS

### Contenidos óptimos

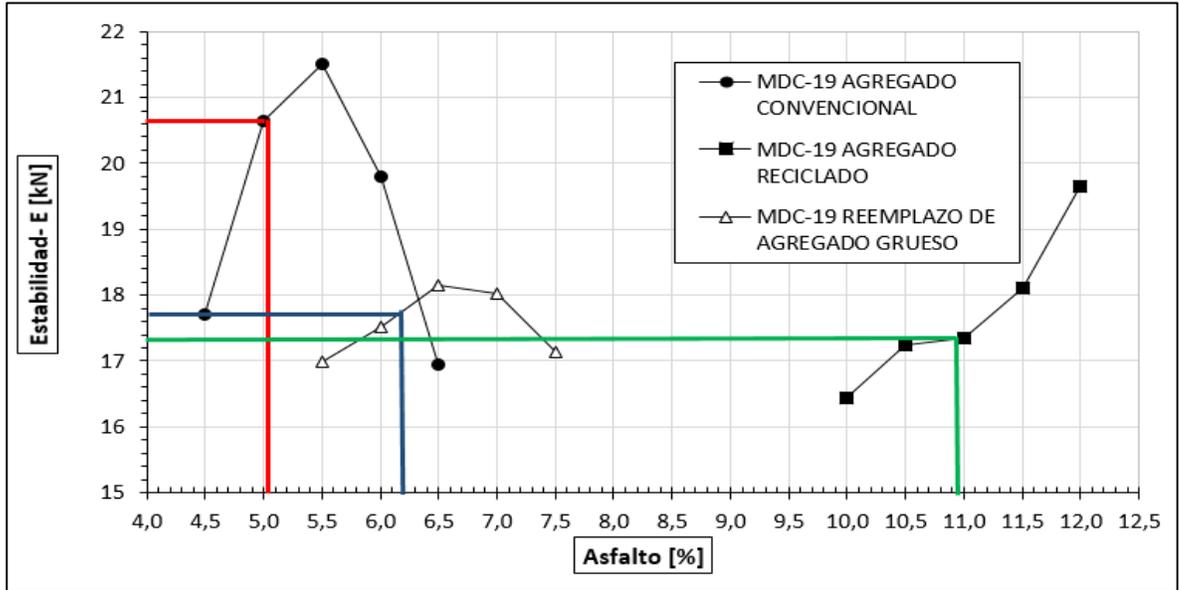
La mezcla asfáltica desarrollada con agregado convencional arrojó resultados de normales características, dando un valor óptimo de contenido de asfalto de 5.05% en peso. Como era de esperarse, debido a la porosidad del agregado reciclado, la mezcla asfáltica desarrollada con este material dio como resultado un contenido óptimo mucho más elevado, de 10.95% en peso, aunque no se encontraba dentro del alcance del proyecto, el equipo realizó una tercera mezcla en la cual se usó agregado grueso reciclado y fino convencional, en esta se alcanzó un contenido óptimo de 6.2%, que aunque sigue siendo elevado, la combinación de agregados permite una mezcla un poco más normalizada, esto concuerda con lo concluido por Pasadin y Pérez<sup>46</sup>, quienes en su trabajo con materiales reciclados concluyen que se debe limitar el contenido de agregados reciclados en las mezclas bituminosas.

Los parámetros evaluados de las mezclas desarrolladas en la investigación se presentan en las **Figuras 38 a 43**, en cada una de ellas se exponen las tres mezclas desarrolladas para poder tener una visión más general de los resultados. Los datos y cálculos para la obtención de las gráficas se presentan en **Anexo C** (Marshall con

<sup>46</sup> PASADIN y PÉREZ, op. cit. P.17

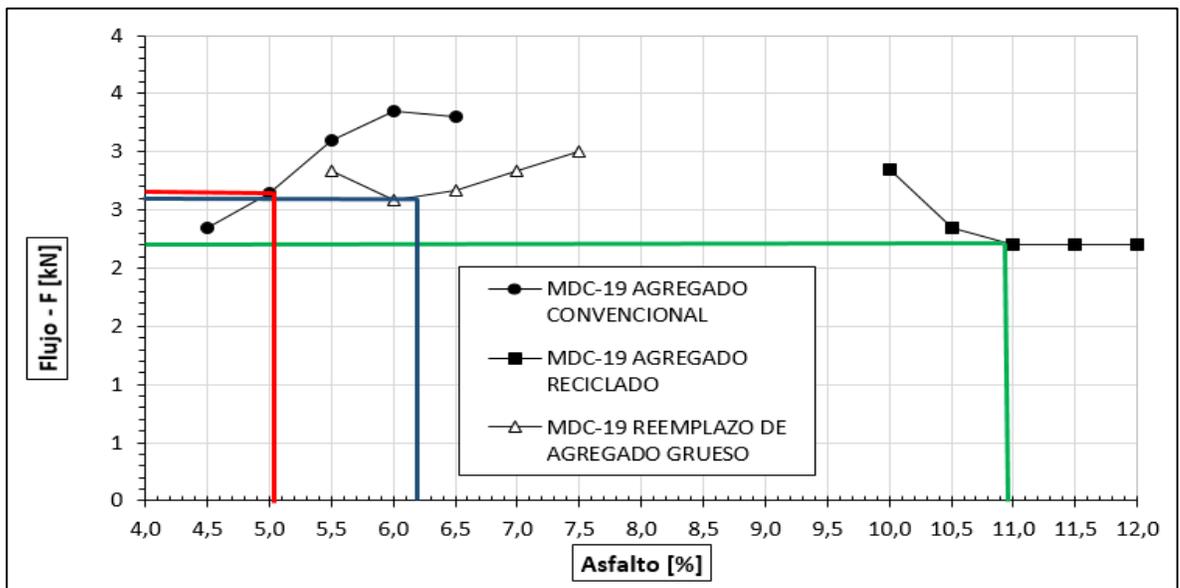
agregados convencionales), **Anexo D** (Marshall con agregado reciclado) y **Anexo E** (Marshall con agregado reemplazo grueso).

**Figura 38. Grafica de estabilidad Vs % de asfalto**



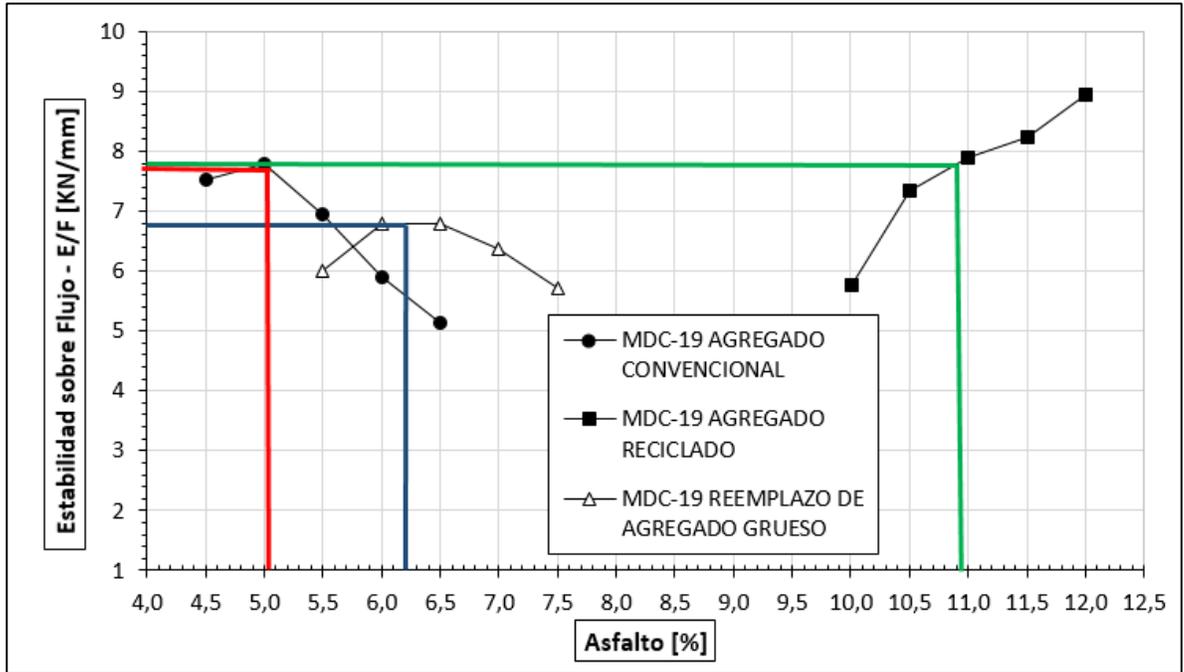
Fuente: Elaboración propia

**Figura 39. Grafica flujo Vs % Asfalto**



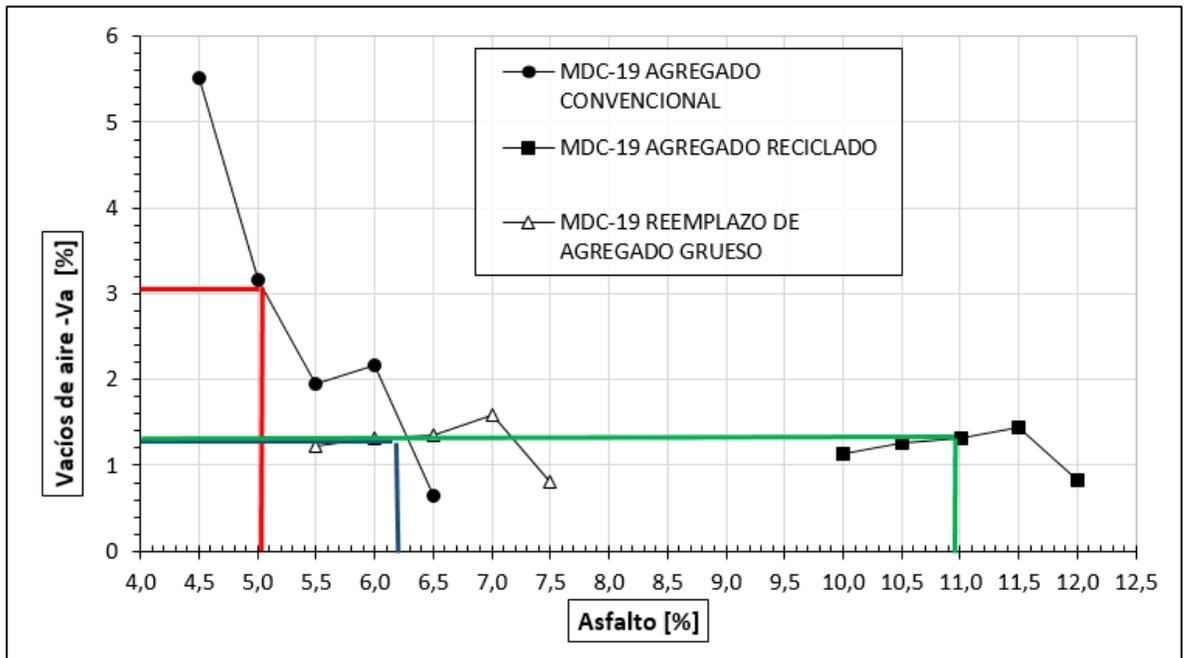
Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Grafica relación estabilidad/flujo Vs % Asfalto



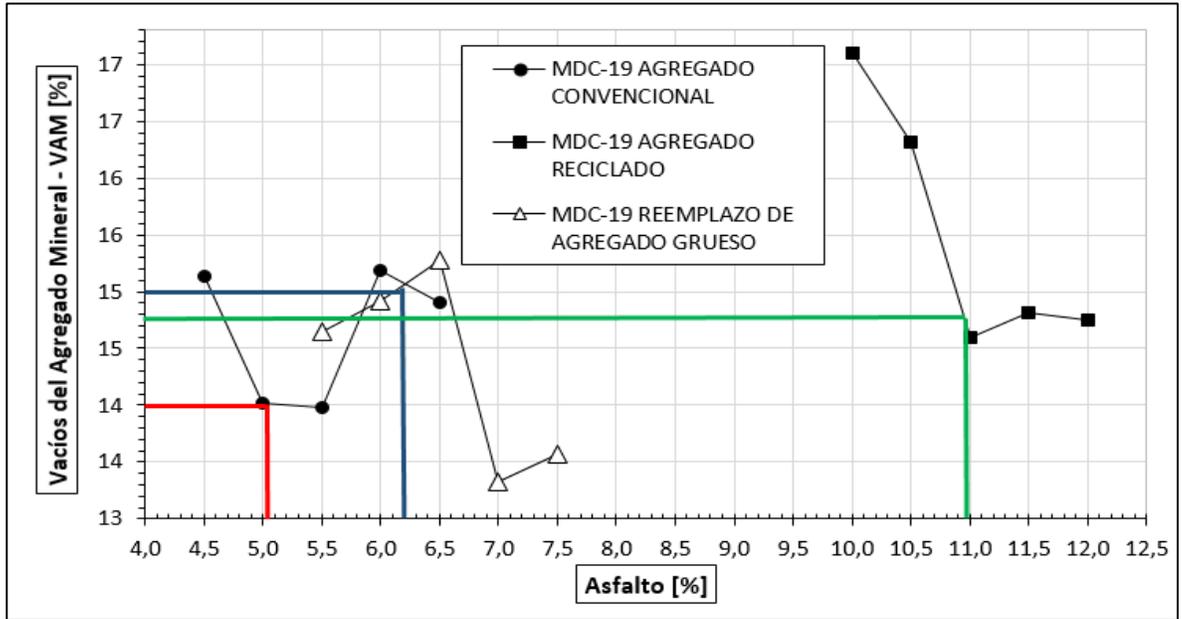
Fuente: Elaboración propia

Figura 41. Vacíos con aire Vs % de asfalto



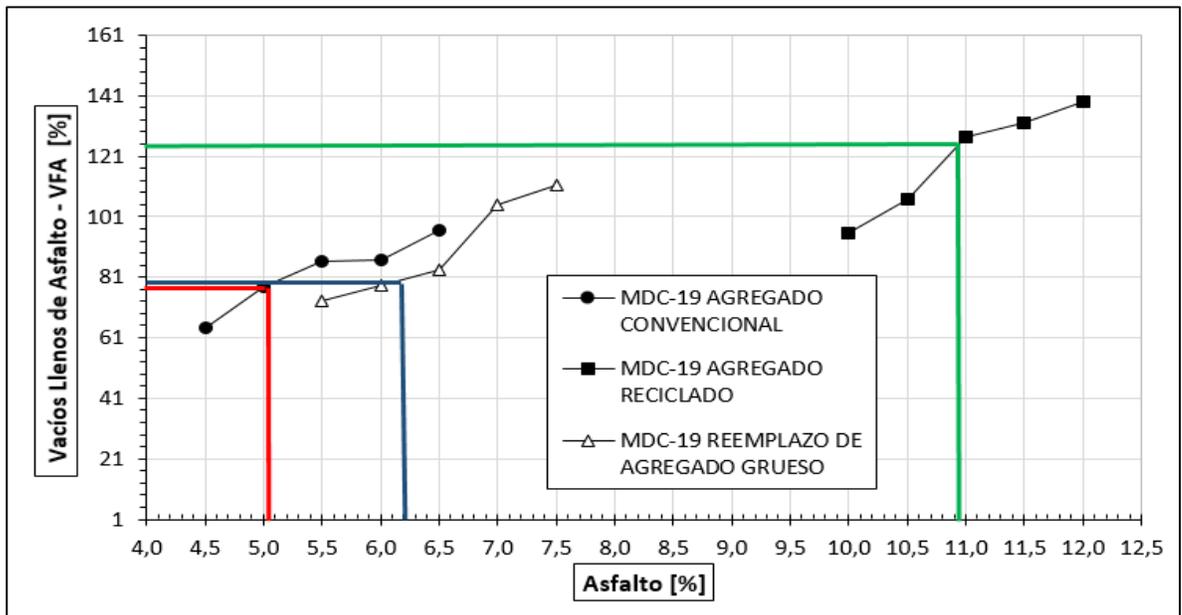
Fuente: Elaboración propia

**Figura 42. Vacíos en el agregado mineral Vs % de asfalto**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 43. Vacíos llenos de asfalto Vs % de asfalto**



Fuente: Elaboración propia

**Parámetros de la mezcla.** A partir de los resultados, se observó que las curvas de los parámetros de la mezcla de los AR y ARG presentaron tendencias similares, solo que desplazadas en el eje en función al contenido de asfalto como se observó en las respectivas gráficas. En la tabla 14 se presentan las características evaluadas y los parámetros presentados en el artículo ART-450-13.

**Tabla 14. Resultados y especificaciones de las mezclas asfálticas evaluadas en la investigación para las mezclas con contenidos óptimos de asfalto.**

CARACTERÍSTICA		ENSAYO INV	MATERIAL			ESPECIFICACIÓN NT3
			AC	AR	ARG	
Estabilidad Mínima [N]		E-748	20700	17400	17800	9000
Flujo [mm]			2.7	2.2	2.6	2.0 - 3,5
Relación Estabilidad / Flujo [KN/mm]			7.7	7.84	6.79	3.0 - 6.0
Vacíos con aire, Va [%]	Rodadura	E-736	3.04	1.31	1.32	4.0 - 6.0
	Intermedia					4.0 - 7.0
	Base					5.0 - 8.0
Vacíos agregados minerales, VAM [%]	T. Máx. 19mm	E - 799	15	15	15	15
Vacíos llenos de asfalto, VFA [%]		E - 799	78.8	125.2	80.25	63 - 75

**Fuente:** Elaboración propia

**Estabilidad.** En la tabla 15 se puede observar un resumen de los valores promedio por cada contenido de asfalto obtenidos en el ensayo de estabilidad, los cuales se encontraron por encima del valor mínimo en los tres casos evaluados; Como era de esperarse, la mezcla desarrollada con AC estuvo por encima de las dos mezclas que involucran agregados reciclados, las cuales desarrollan valores similares de estabilidad entre sí, lo anterior es un indicador de que la resistencia de las probetas está dada en un alto porcentaje en función del agregado grueso, aunque este presentó una menor resistencia que el convencional; Lo anterior se puede explicar debido a que el agregado grueso reciclado presente en algunas partículas un recubrimiento de mortero o pasta de cemento, la cual reduce la resistencia; Esto sumado al alto desgaste del agregado reciclado genera una disminución de la resistencia de las probetas. Sin embargo la variación entre estos datos, analizada mediante ANOVA (ver tabla 21) permitió concluir con una probabilidad de equivocación del 12% que esto no representó una variación estadísticamente significativa.

**Flujo.** El flujo que se obtuvo para los tres diferentes tipos de mezcla cumplió con los valores límites presentados en el ART 450 del INVIAS, sin embargo se puede observar que se presenta un valor más bajo en la mezcla de AR, lo que representa una mayor rigidez, lo cual se puede explicar por el alto consumo de asfalto y el bajo porcentaje de vacíos que muestran una probeta mucho más compacta.

No obstante, al realizar el análisis ANOVA se encontró que existe una variación estadísticamente significativa, por lo cual se realizó una prueba múltiple de rangos, la cual permite observar que existe una variación estadísticamente significativa (ver tabla 22) entre los resultados de flujo presentados por las probetas AC y AR.

**Relación Estabilidad- Flujo.** El límite para esta relación según la normatividad colombiana fue de seis, tomando el valor de estabilidad en KN y el flujo en mm, como se observó en los resultados ninguna de las mezclas asfálticas con las cuales se trabajó en este proyecto cumple con la normatividad, siendo la mezcla AR la cual se encontró más lejos del valor límite de la especificación; Sin embargo los valores no presentaron una variación estadísticamente relevante entre sí, pudiéndose afirmar que los valores de Estabilidad / Flujo fueron iguales con una probabilidad de equivocación de 14%.

Esta relación es una medida de la rigidez de las probetas, esto explica lo que se menciona más adelante en el literal 2.3, donde se muestra que la falla que presentaron las probetas desarrolladas con AR fue diferente a la experimentada por las dos mezclas restantes, para las mezclas elaboradas con AR se presentó un desprendimiento total, mientras que las mezclas con AC y ARG presentaron simplemente deformación con algunos desprendimientos de material. (**Ver figura 48 y 49**); Basándose en la forma de falla, en el valor de estabilidad y los valores de flujo se puede decir que las probetas elaboradas con AR fueron más rígidas. En la tabla 15 se presentan los valores promedio por cada contenido de asfalto obtenidos para estabilidad, flujo y la relación entre ellos.

**Tabla 15. Datos promedio de estabilidad y flujo para los tres diferentes tipos de mezcla.**

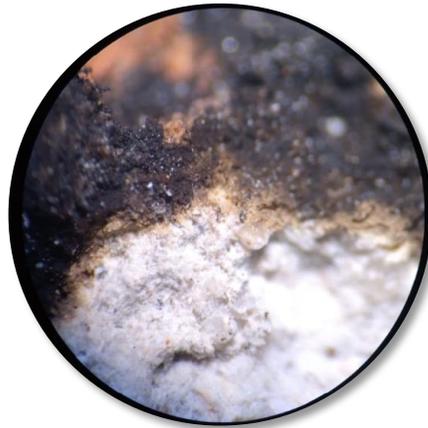
Ensayo Marshall				
Tipo de mezcla	Asfalto [%]	ESTABILIDAD [KN]	FLUJO [mm]	E / F [KN/mm]
MDC-19 AGREGADO CONVENCIONAL	4.50	17.71	2.35	7.54
	5.00	20.64	2.65	7.79
	5.50	21.51	3.10	6.94
	6.00	19.79	3.35	5.91
	6.50	16.94	3.30	5.13
MDC-19 AGREGADO RECICLADO	10.00	16.75	2.85	5.88
	10.50	15.62	2.35	6.65
	11.00	16.44	2.20	7.47
	11.50	17.05	2.20	7.75
	12.00	18.41	2.20	8.37
MDC-19 REEMPLAZO DE AGREGADO GRUESO	5.50	16.99	2.83	6.00
	6.00	17.52	2.58	6.78
	6.50	18.14	2.67	6.80
	7.00	18.03	2.83	6.36
	7.50	17.15	3.00	5.72

**Fuente:** Elaboración propia

**Vacíos.** Como se expresó en el literal 1.3.4, los vacíos de aire VA no se pudieron obtener de un manera acertada aplicando la especificación INV-E 799, debido a que la fórmula planteada en la norma presenta fallas cuando la densidad real de la briqueta supera la densidad teórica, razón por la cual el equipo investigador tomo la decisión de utilizar una relación diferente con el fin de observar el comportamiento. La razón de este comportamiento se puede explicar siguiendo el mismo análisis que se desarrolla en el literal 1.3.1 para la obtención de la cantidad de materiales para las probetas desarrolladas con AR y ARG; Se puede explicar que la densidad real supera a la densidad teórica debido a los procesos de compactación, en donde las partículas con una interfaz de mortero que ocupan un determinado espacio a someterse a la compactación pasan por un proceso de desgaste y reacomodo en el cual se generan un poco más de finos como se constató en el análisis de quiebra de partículas (se presenta a continuación), en consecuencia se tiende a llenar los espacios entre ellas, además las probetas elaboradas con AR presentaron un decrecimiento en su altura posterior al proceso de compactación, esto indica que las probetas elaboradas con AR y ARG tienen un menor volumen, haciendo que la densidad se incremente proporcionalmente, lo que responde el por qué la densidad real sobrepasa a la teórica.

Lo anterior expone una idea sobre él porque existe una sub estimación de Vacíos de aire  $V_a$  y una sobre estimación de Vacíos Llenos de asfalto VFA, es importante mencionar que debido a la porosidad de los agregados reciclados, una parte del asfalto entra en los poros del mismo, lo cual conlleva a un consumo más elevado de ligante y afecta también la evaluación de los vacíos debido a que no se puede predecir correctamente el contenido de asfalto que realmente está trabajando.

**Figura 44. Interfaz ligante- agregado para un probeta de agregado reciclado.**



**Fuente:** Registro fotográfico, William Ruiz.

En el desarrollo de la investigación se siguió los parámetros de la norma en la manera en que se trabajaría con una agregado convencional, sin embargo en vista de que los parámetros volumétricos siguiendo la especificación INV-E 799 arrojaron resultados imprecisos, se planteó modificar la forma de encontrar los vacíos llenos de asfalto con la ecuación postulada en el literal 1.3.4. Se procedió con ese resultado encontrar los parámetros de la mezcla relacionados a este; Vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VFA), con lo cual se puede llegar a valores coherentes y que corresponden a la realidad, en la tabla 16 se presentan la comparación entre la manera típica de calcular los parámetros volumétricos y la corrección propuesta. Los cálculos se presentaron en **Anexo D y E.**

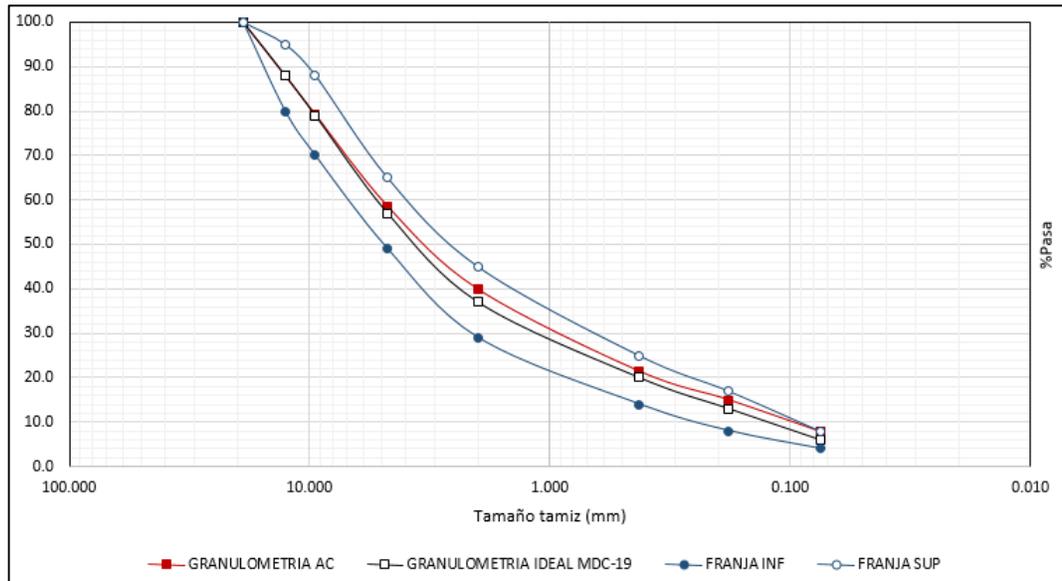
**Tabla 16. Comparación de los parámetros volumétricos entre la especificación INV-E 799 y la corrección propuesta en la investigación.**

TIPO DE MEZCLA	Asfalto [%]	INV-E 799			CORRECCIÓN PROPUESTA		
		Va [%]	VAM [%]	VFA [%]	Va [%]	VAM [%]	VFA [%]
RECICLADO	10	0,885	17,31	95,56	1,14	17,56	93,81
	10,5	-0,989	16,52	106,67	1,26	18,76	93,45
	11	-3,988	14,80	127,26	1,31	20,10	94,03
	11,5	-4,723	15,01	131,91	1,44	21,18	94,07
	12	-5,778	14,95	138,95	0,83	21,56	96,22
REEMPLAZO GRUESO	5,5	4,05	14,85	72,98	1,22	12,02	90,39
	6	3,31	15,12	78,17	1,31	13,12	90,06
	6,5	2,66	15,47	83,64	1,35	14,16	90,74
	7	-0,62	13,53	105,15	1,58	15,72	89,98
	7,5	-1,47	13,77	111,47	0,81	16,05	95,24

Fuente: Elaboración propia

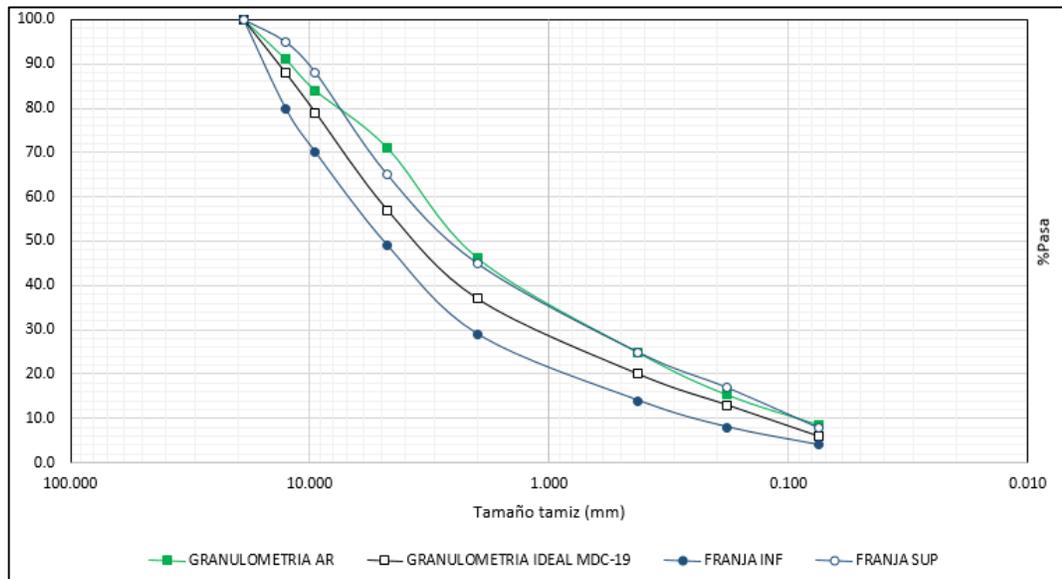
**Quiebra de partículas.** Basado en los resultados de desgaste del agregado, el material convencional presentó una variación mínima en la curva granulométrica posterior al proceso de compactación. Sin embargo para las mezclas desarrolladas con agregado reciclado se presentó una variación considerable. Se evidenció una curva granulométrica similar en las dos mezclas desarrolladas con agregados reciclados, aclarando que entre las dos mezclas el factor común fue el agregado grueso reciclado, se observó que la fracción gruesa reciclada es la que presentó mayor sensibilidad al proceso de compactación del método Marshall. Esto se evidenció también ya que se presentó un desgaste mayor comparado los resultados de la fracción gruesa y fina en el aparato Micro-Deval como se presentó en el literal 2.1, y entendiendo además que la interfaz de mortero adherida a las partículas de roca es débil y altamente susceptible a la degradación. En la curva granulométrica se pudo observar que partículas de tamaños 1/2" y 3/8" pasaron a ser parte de los tamaños comprendidos en el tamiz #4 y siguientes. En **Anexo F** se presentó los datos y cálculos para este parámetro. A continuación se presentan en las **Figuras 45 a 47** los resultados para cada tipo de mezcla:

**Figura 45. Granulometría de la mezcla realizada con agregado convencional.**



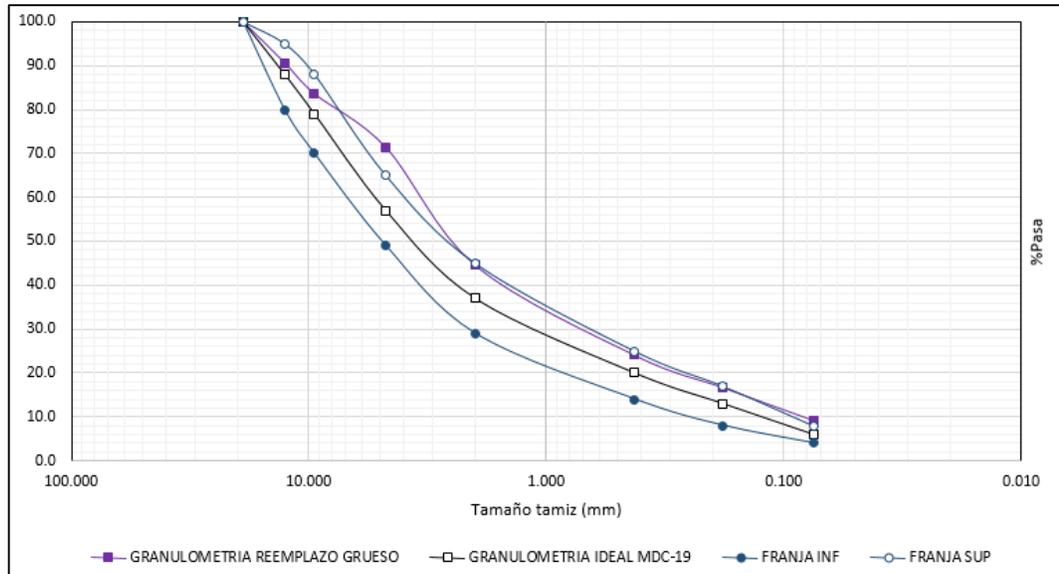
Fuente: Elaboración propia

**Figura 46. Granulometría de la mezcla realizada con agregados reciclados**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 47. Granulometría de la mezcla realizada con agregado grueso reciclado y fino convencional**



**Fuente:** Elaboración propia

Con el fin de tener un mejor entendimiento del comportamiento que presentó el material dentro de la mezcla asfáltica se calculó también el índice de quiebra de partículas mediante la metodología propuesta por Quiñones<sup>47</sup> en su tesis doctoral:

$$Iq = \sum_{k=1}^n (\Delta W_k)$$

Dónde:

Iq: Índice de quiebra de partículas

$\Delta W_k$ : Diferencia porcentual entre el peso de las porciones de igual tamiz antes y después de la compactación

<sup>47</sup> QUIÑONES OP. Cit

**Tabla 17. Índice de quiebra de partículas**

ÍNDICE DE QUIEBRA DE PARTÍCULAS				
TAMIZ		ΔW		
Estándar	mm	AC	AR	ARG
3/4"	19.000	0.0	0.0	0.0
1/2"	12.700	0.0	3.1	2.7
3/8"	9.510	0.3	1.9	2.0
#4	4.760	1.4	9.1	9.8
#10	2.000	1.3	0.0	0.0
#40	0.425	0.0	0.0	0.0
#80	0.180	0.6	0.0	0.0
#200	0.075	0.0	0.3	0.0
FONDO		0.0	0.0	0.0
ÍNDICE		3.5	14.3	14.4

**Fuente:** Elaboración propia

Los datos presentados en la Tabla 17, apoyan lo dicho anteriormente en este literal aunque se presentó una subestimación del verdadero valor del índice de quiebra, se observó que la diferencia porcentual entre el peso de las porciones es elevado en los tamices de 1/2 hasta #4 y nulo en los tamices siguientes para materiales con presencia de agregados reciclados, esto se explica en razón de que los agregados de mayor diámetro se desgastan y producen gran cantidad de nuevos tamaños inferiores, lo cuales van ocupando el lugar de los agregados ya desgastados de los tamices inferiores, es por eso que diferencia porcentual entre el peso de las porciones del tamiz #4 e inferiores es cero, debido a los finos producidos en las fracciones gruesas y que se van acumulando en los tamices de la fracción fina.

### 2.3. FORMA DE FALLA.

Como se mencionó anteriormente, el método Marshall busca encontrar el punto de falla de las probetas cilíndricas, el cual se presenta con una deformación excesiva ya que el material alcanza el límite plástico, es decir que la deformación no es recuperable; La deformación obtenida en este ensayo cambia la forma de la probeta desde su forma circular a una ovalada con algunos desprendimientos de material, sin embargo en el desarrollo del trabajo de investigación se encontró que la forma de falla se modificó dependiendo del tipo de agregado.

Las probetas con la totalidad de la gradación desarrollada con agregados reciclados presentaron deformaciones bajas y la falla de estas, dividió en la mayoría de casos la probetas en dos fracciones y algunos desprendimientos, falla similar a la obtenida en el ensayo de tracción indirecta, lo cual muestra una mayor rigidez en mezclas desarrolladas con agregados reciclados, sin embargo en la mezcla asfáltica desarrollada con una combinación de agregados convencionales y reciclados, la falla se presentó de manera típica, ver **Figura 48 y 49**.

**Figura 48. Probetas luego de ensayo Marshall. (Izquierda) Probeta Convencional, (Centro) Probeta 100% Ag Reciclado, (Derecha) Probeta con reemplazo del agregado grueso.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

**Figura 49. Probeta luego de ensayo Marshall con agregados reciclados.**



**Fuente:** Registro Fotográfico, Nelson Villota.

## **2.4. TRACCIÓN INDIRECTA**

Del ensayo de tracción indirecta se obtuvo los resultados expuestos en las tablas 18,19 y 20, de estos se observa que la menor resistencia seca la presentaron las probetas desarrolladas con el 100% de material reciclado, aunque no presentan una gran diferencia con las probetas desarrolladas con reemplazo de agregados gruesos y fino convencional, sin embargo existe una diferencia estadísticamente considerable si se compara con las mezclas desarrolladas con material convencional. Se presenta en las **Figuras 50 a 52** las probetas después del ensayo.

**Tabla 18. Ensayo de tracción indirecta a mezcla con agregados convencionales.**

ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA MATERIAL CONVENCIONAL					
Identificación de la muestra		GRUPO HÚMEDO			
		M4	M5	M6	Prom
Carga (N)	P	9315.00	9347.00	9333.00	9331.67
Resistencia húmeda $2000P'/\pi t'D$	Rth	900.52	919.86	913.97	911.45
Identificación de la muestra		GRUPO SECO			
		M1	M2	M3	Prom
Carga (N)	P	9443.00	9462.00	9481.00	9462.00
Resistencia seca $2000P'/\pi t'D$	Rts	902.56	913.36	910.03	908.65

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 19. Ensayo de tracción indirecta a mezcla con agregados reciclado.**

ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA MATERIAL RECICLADO					
Identificación de la muestra		GRUPO HÚMEDO			
		M4	M5	M6	Prom
Carga (N)	P	6343.00	6361.00	6344.00	6349.33
Resistencia húmeda $2000P'/\pi t'D$ ( $N/mm^2$ )	Rth	653.13	665.32	664.31	660.92
Identificación de la muestra		GRUPO SECO			
		M1	M2	M3	Prom
Carga (N)	P	6828.00	6848.00	6830.70	6835.57
Resistencia seca $2000P'/\pi t'D$ ( $N/mm^2$ )	Rts	713.69	707.37	711.69	710.92

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 20. Ensayo de tracción indirecta a mezcla con reemplazo de agregado grueso.**

ENSAYO TRACCIÓN INDIRECTA MATERIAL AGREGADO REEMPLAZO GRUESO					
Identificación de la muestra		GRUPO HÚMEDO			
		M4	M5	M6	Prom
Carga (N)	P	7757.00	7710.00	7740.00	7735.67
Resistencia húmeda $2000P'/\pi t'D$ ( $N/mm^2$ )	Rth	656.39	646.65	647.70	650.25
Identificación de la muestra		GRUPO SECO			
		M1	M2	M3	Prom
Carga (N)	P	8490.00	8430.00	8470.00	8463.33
Resistencia seca $2000P'/\pi t'D$ ( $N/mm^2$ )	Rts	733.86	706.64	708.02	716.17

Fuente: Elaboración propia

**Figura 50. Probeta de agregado convencional luego del ensayo de tracción indirecta**



Fuente: Registro Fotográfico, Nelson Villota.

**Figura 51. Probeta de agregado reciclado luego del ensayo de tracción indirecta**



Fuente: Registro Fotográfico, Nelson Villota.

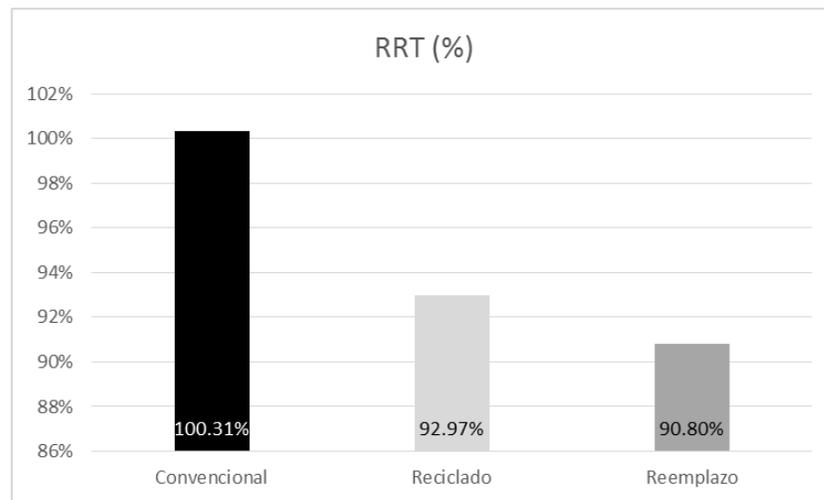
**Figura 52. Probeta de agregado combinado luego del ensayo de tracción indirecta**



Fuente: Registro Fotográfico, Nelson Villota.

Se observó en las **Figuras 51 y 52** que las probetas con agregados reciclados presentaron un mayor porcentaje de partículas fracturadas, lo cual indica una menor resistencia por parte del agregado grueso reciclado. Por su parte, se evidenció una mayor afectación en las probetas con material reciclado en estado húmedo, esto se comprueba en la **Figura 53**, donde se puede observar una menor relación de resistencia a la tracción RRT.

**Figura 53. Resultados del ensayo de relación de tracción indirecta**



**Fuente:** Elaboración propia.

En **Anexo F** se presentaron los datos y cálculos para la obtención de los parámetros de tracción indirecta.

## 2.5. ANÁLISIS ANOVA

El análisis estadístico efectuado por los autores evaluó diferencias entre los resultados, basándose en esas diferencias estadísticas se acepta o rechaza la hipótesis, Los resultados del análisis de varianza ANOVA se presentan en la tabla 21.

**Tabla 21. Resumen datos ANOVA**

	MATERIALES			ANOVA			HIPÓTESIS NULA
	AC	AR	ARG	F	P	Fc	
Estabilidad [E]	17,71	16,44	16,99	2,52	0,12	3,89	ACEPTADA
	20,64	17,23	17,52				
	21,51	17,35	18,14				
	19,79	18,10	18,03				
	16,94	19,65	17,15				
Flujo [F]	2,35	2,85	2,83	4,71	0,03	3,89	RECHAZADA
	2,65	2,35	2,58				
	3,10	2,20	2,67				
	3,35	2,20	2,83				
	3,30	2,20	3,00				
E/F	7,54	5,77	6,00	2,35	0,14	3,89	ACEPTADA
	7,79	7,33	6,78				
	6,94	7,89	6,80				
	5,91	8,23	6,36				
	5,13	8,94	5,72				
RRT [%]	99,77	91,51	89,44	58,55	0,00012	5,14	RECHAZADA
	99,29	94,06	91,51				
	99,57	93,34	91,48				

Fuente: Elaboración propia.

Es importante aclarar que a pesar de que estadísticamente se rechaza el resultado de flujo y relación de tracción indirecta, debido a su respectiva varianza, los resultados de las tres mezclas se encontraron dentro de la especificación como se muestra en la *tabla 14*; Sin embargo ya que se rechazaron 2 hipótesis nulas, se optó por realizar una prueba de rangos múltiples para encontrar las mezclas que presentan la diferencia estadísticamente significativa, estos resultados se indican en la *Tabla 22*.

**Tabla 22. Prueba múltiple de rangos.**

	Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
FLUJO	AC - AR	*	0.59	0.431655
	AC - ARG		0.168	0.431655
	AR - ARG		-0.422	0.431655
RRT	AC - AR	*	6.57333	2.06159
	AC - ARG	*	8.73333	2.06159
	AR - ARG	*	2.16	2.06159

\* indica una diferencia significativa.

Fuente: Elaboración propia.

Las mezclas asfálticas desarrolladas en esta investigación presentaron una variación estadísticamente no significativa entre los diferentes parámetros, salvo en los propiedades de flujo y la relación de tracción indirecta, los cuales como se mostró en la prueba múltiple de rangos presentada en la *tabla 22*, donde se observó que la variable dependiente *flujo* presentó una variación estadísticamente significativa entre en AC y AR, lo que representó que el valor de este en la mezcla elaborada con AR se aleja del valor de flujo de la mezcla patrón elaborada con AC; Y para variable dependiente *relación de resistencia de tracción* existe una variación estadísticamente significativa entre las tres mezclas, lo que significa que existió una mayor susceptibilidad al agua por parte de la mezcla desarrollada con AR y al mismo tiempo con ARG debido a que estas se alejaron de la mezcla patrón y entre sí.

## 2.6. EVALUACIÓN DE LA MEZCLA COMO CAPA DE RODADURA

Con el fin de evaluar la viabilidad de usar la mezcla asfáltica desarrollada con agregados reciclados y con el reemplazo del agregado grueso reciclado como capa de rodadura, se realizó el análisis de cada una de las propiedades y su comparación con los criterios que exige el Instituto Nacional de Vías. ( **Ver tabla 23**)

**Tabla 23. Criterios mínimos encontrados en la investigación para el diseño preliminar de mezcla asfáltica densa en caliente por el método Marshall y especificación de la tabla 450-10 del Art450-13**

CARACTERÍSTICA		ENSAYO INV	MATERIAL		ESPECIFICACIÓN NT3	
			AR	ARG		
Estabilidad Mínima [N]		E-748	17400	17800	9000	Cumple
Flujo [mm]			2.2	2.6	2.0 - 3,5	Cumple
Relación Estabilidad / Flujo [ KN/mm]			7.84	6.79	3.0 - 6.0	No cumple
Vacíos con aire, Va [%]	Rodadura	E-736	1.31*	1.32*	4.0 - 6.0	No cumple
	Intermedia				4.0 - 7.0	
	Base				5.0 - 8.0	
Vacíos agregados minerales, VAM [%]	T. Máx. 19mm	E - 799	15	15	15	Cumple
Vacíos llenos de asfalto, VFA [%]		E - 799	125.2*	80.25*	63 - 75	No cumple

**Fuente:** Elaboración propia

\*Este parámetro se encontró con las relaciones presentadas en la especificación correspondiente, sin embargo en el *literal 3.2* se presentó una corrección para encontrar un resultado que represente un valor acorde a la situación.

Según la normatividad colombiana una mezcla asfáltica en caliente de gradación continua requiere cumplir con cada uno de los parámetros anteriormente mencionados para que pueda ser usada como capa de rodadura en una estructura de pavimento; Las mezclas desarrolladas con agregados reciclados sin ningún

tratamiento más que la trituración, resultan insatisfactorias según las especificaciones referidas al artículo ART 450-13.

A pesar de los parámetros que no se encontraron dentro de la especificaciones, existen otros como la estabilidad el cual arrojó resultados que superan en más de 1.5 veces a la especificación, o el flujo, valor que se encontró dentro del rango propuesto por la norma, por lo cual no se debe desestimar la mezcla completamente.

## 2.7. ANÁLISIS COMO BASE ESTABILIZADA CON EMULSIÓN

Con el propósito de ampliar el rango de aplicación de los materiales reciclados producto de demolición de mampostería y concreto en estructura de pavimento y teniendo en cuenta que el material producto de análisis en este trabajo no se encontró en los rangos necesarios para satisfacer completamente los criterios para su aplicación en capas de rodadura; Es posible analizar su capacidad en función de la normatividad vigente para su uso en *base estabilizada con emulsión asfáltica* (BEEA) establecida en el ART 340-13<sup>48</sup> del instituto nacional de vías.

En el Art 340-13 se contempló la ejecución de más ensayos de los que se desarrollaron en esta investigación para determinar si el material se puede usar como BEEA, sin embargo con los resultados encontrados en las mezclas desarrolladas con agregado reciclado y el reemplazo del agregado grueso en cuanto a estabilidad, flujo y las características de resistencias del material evaluadas mediante los ensayos INV-E 218-13 e INV-E 238-13; se observó un buen comportamiento físico-mecánico, además de tener la posibilidad de adaptar la franja granulométrica modificando el proceso de trituración.

**Tabla 24. Requisitos disponibles del artículo Art 340-13 para emplear un agregado en Bases estabilizada con emulsión asfáltica**

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL		REQUISITO
		AC	AR	
Dureza, agregado grueso				
Desgaste en Máquina de los Ángeles, gradación A, máximo (%) - 500 revoluciones	INV-E-218	26.74	40	<50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	INV-E 238	11.55	30.92	<45

**Fuente:** Elaboración propia.

<sup>48</sup> INVIAS. Art 340-13 Base estabilizada con emulsión asfáltica. 2013

En el alcance del trabajo de investigación no se contempló el desarrollo de ensayos con emulsiones asfálticas, sin embargo con los resultados anteriormente mencionados y mediante análisis teóricos se considera que este material tiene una alta probabilidad de desempeñarse satisfactoriamente como una *Base estabilizada con emulsión asfáltica*.

### 3. CONCLUSIONES

#### AGREGADOS

- Se tomó muestras en extremo heterogéneas y con presencias no deseadas, al no existir en las escombreras procesos para el tratamiento de materiales lo cual repercutió directamente disminuyendo el desempeño físico-mecánico del material.
- No existió dentro de la normatividad del INVIAS especificaciones técnicas para la caracterización de materiales reciclados y ya que el material reciclado se evaluó con técnicas que no son diseñadas para las condiciones que este pueda presentar, se pudo sub o sobre estimar propiedades del mismo.
- Se observó que la muestras de residuos de construcción presentaron una heterogeneidad tanto en calidad como en su composición, pasando de partículas de mortero y mampuestos a agregados naturales recubiertos de mortero y algunos más prácticamente intactos, además de elementos constructivamente no aptos como madera, cartón, yeso, entre otros, lo cual implicó la necesidad de una selección para este material.
- Se observó la necesidad crear una guía donde se den a conocer y se aclaren los procedimientos de una demolición y disposición del material de residuo, de ser posible esta guía debería contar con la base de datos suficiente para hacer una clasificación sectorial y constructiva de las zonas que alimentan a los puntos de acopio de desechos (escombrera).
- El agregado reciclado que se obtuvo en esta investigación presentó en su composición una alta proporción de elementos de baja densidad como mampostería y mortero, con un 58% en el agregado grueso y un 62% en agregado fino.
- En el proceso de trituración de los residuos de construcción para su transformación en agregados reciclados, se constató que es posible obtener nuevamente el agregado grueso natural presente en los elementos de concreto, recubiertos en un bajo porcentaje de pasta de cemento.
- Fue posible determinar de manera cuantitativa que los agregados reciclados presentan una absorción hasta 4.5 veces mayor en agregados reciclados que en convencionales.

- Se observó que debido a la absorción de los agregados reciclados se afecta directamente el consumo de asfalto, presentando problemas al momento de calcular los vacíos en la mezcla, sobreestimando los vacíos llenos de asfalto (VFA) y subestimando los Vacíos de aire (Va).
- Se encontró que la densidad del agregado reciclado es menor respecto a la de agregados convencionales, lo que afecta significativamente el desempeño en la mezcla asfáltica, esto se pudo explicar por el mortero adherido a la superficie de los agregados gruesos, haciendo que estos ocupen un mayor volumen pero con una masa menor. Además de la presencia de mampuestos que son ampliamente conocidos por su alta porosidad y bajo peso unitario.
- El desgaste evaluado al agregado reciclado demostró ser hasta 1.5 veces más elevado que para el agregado convencional, pudiéndose explicar por los elementos que lo componen, como el mortero adherido a los granos de piedra, los cerámicos y mampuestos representan la fase débil, aumentando enormemente el porcentaje de material desprendido.
- En cuanto a la geometría de las partículas de agregado reciclado presentó cualidades deseadas para su uso, esto se puede explicar debido al proceso de demolición y el proceso de trituración al que fueron sometidos; Como era de esperarse se obtuvieron partículas con formas y texturas óptimas que garantizan una buena traba entre partículas.

## **MEZCLAS BITUMINOSAS**

- De manera cualitativa se observó que el tiempo para el recubrimiento (tiempo de mezcla) de los agregados reciclados con ligante asfáltico fue un poco más elevado respecto al agregado convencional, esto pudo ser causado por la alta porosidad y rugosidad de los morteros adheridos a la interfaz de la roca, además de los elementos provenientes de mampostería.
- Para poder utilizar el molde en la elaboración de probetas descrito en la metodología Marshall (INV-E 748-13) fue necesario realizar una modificación a la cantidad de materiales que se emplean en la mezcla haciendo una relación de volúmenes entre agregados convencionales y reciclados, encontrando así el peso de los materiales a utilizar.
- Mediante el ensayo DNER-ME 078-94, se observó una menor adhesividad de asfalto al agregado reciclado que al convencional, sin embargo debido a la densidad del material reciclado, la cantidad de partículas recicladas que se usaron para el procedimiento fue mayor a las convencionales, lo cual pudo modificar el resultado del ensayo.

- Se observó una relación inversamente proporcional entre el consumo de asfalto y la cantidad de agregado reciclado presente en la mezcla asfáltica, por lo tanto se debe limitar la cantidad de agregado reciclado presente en la mezcla.
- Con los resultados de densidad y porosidad de los agregados reciclados se observó que es más eficiente realizar un reemplazo de los agregados gruesos respecto a los agregados finos.
- Los resultados de estabilidad y flujo de las probetas desarrolladas con agregados reciclados arrojaron resultados que cumplen los límites establecidos en la normatividad colombiana.
- En términos de estabilidad se observó que respecto al contenido óptimo de asfalto existe una relación inversa entre el contenido de asfalto y la estabilidad.
- Se observó que en mezclas desarrolladas con el 100% agregado reciclado el flujo es menor a pesar de su alto contenido de asfalto lo que explica el tipo de falla, que para este caso es una falla frágil.
- Se observó que a mayor contenido de asfalto los vacíos llenos de asfalto en los tres tipos de mezcla presentaron una tendencia creciente y muy similar solo que desplazada en función de la cantidad de ligante.
- A pesar de que los valores de estabilidad y flujo están dentro de los límites de la especificación, se observó que la relación entre estos no lo está, las mezclas con agregados reciclados son más rígidas que las mezclas desarrolladas con agregado convencional debido a su menor volumen lleno de aire.
- Existieron parámetros de las mezclas desarrolladas con agregado reciclado, como los vacíos llenos de asfalto, el volumen de aire en la mezcla y los vacíos en el agregado mineral, los cuales no arrojaron resultados coherentes, debido al elevado contenido de asfalto lo que lleva a sobre estimar dichos parámetros, razón por la cual se hizo necesario emplear otros métodos para su determinación.
- Se observó que las mezclas asfálticas con agregado reciclado limitado a la fracción gruesa, presentaron un mejor desempeño en propiedades físico-mecánicas que un reemplazo de 100% de agregado reciclado.
- Se constató que aunque el agregado reciclado en la mezcla asfáltica no cumplió con todos los requerimientos de la normatividad del INVIAS, al comparar estadísticamente las medias de los resultados experimentales del material reciclado con el agregado de referencia, los ensayos presentaron resultados similares.

- Se constató mediante la prueba de tracción indirecta y el análisis estadístico ANOVA, que las mezclas que contienen agregado reciclado presentaron una mayor susceptibilidad al agua respecto a las mezclas con el 100% de la gradación desarrollada con agregado convencional, evidenciando una mayor afectación en las partículas de agregado grueso que corresponden a mampostería.
- Se evidenció en las mezclas desarrolladas con agregados reciclados y con reemplazo del agregado grueso, que la quiebra de partículas se dio en forma similar, lo cual nos permite concluir que una de las formas de controlar la calidad del agregado, es un mayor control en el proceso de selección y trituración, buscando reducir las partículas de agregados gruesos reciclados que quedan recubiertas por pasta de cemento.

#### 4. RECOMENDACIONES

- En el desarrollo de la presente investigación se evidenció la falta de una metodología que rija los procedimientos a seguir para el análisis y caracterización de agregados reciclados en Colombia.
- En el desarrollo de este proyecto, la trituración del agregado reciclado se realizó de manera manual, esto abre la posibilidad de realizar una investigación en la cual se evalué los agregados con una trituración mecánica.
- Aunque no se encontró dentro del alcance del proyecto, se realizó una mezcla con el reemplazo del agregado grueso convencional por reciclado, sin embargo el reemplazo de este fue del 100%, esto abre la posibilidad a realizar una investigación reemplazando ciertos porcentajes de agregado grueso, buscando obtener una mezcla de mejores características.
- Una posible línea de investigación, es reemplazar en la gradación de la mezcla asfáltica MDC-19 el agregado fino por agregado reciclado y evaluar el comportamiento de esta.
- El proyecto de investigación contemplo un modificación a la mezcla asfáltica reemplazando los agregados, sin embargo se puede plantear un nuevo proyecto de investigación el cual contemple modificar el ligante asfáltico.
- Como se mostró en el literal 2.7, es probable que el material reciclado sin ninguna modificación cumpla como base estabilizada con emulsión asfáltica, lo cual abre la posibilidad de investigar este material como tal siguiendo el artículo ART-340-13 del INVIAS.

## BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, D. MOLL, R., y GONZÁLES, G. Influencia de la utilización de RCD como árido en mezclas asfálticas en caliente. En: Revista de Arquitectura e ingeniería. Vol. 11, No. 1. ISSN 1990-8830/RNPS 2125.

Alcaldía de Bogotá. Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra. Bogotá 2015.

ARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. K., Y TASA, D. Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física. 2005.

ART 100-13 INVIAS 2013 Ámbito de aplicación, términos y definiciones.

ART- 340-13 Base estabilizada con emulsión asfáltica.

ART- 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Concreto asfáltico.

BARRERA, Edward. OLMEDO, Omar. Utilización de residuos de construcción y demolición (RCD) ligados con materiales cementantes en pavimentos. Trabajo de grado: Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil Santiago de Cali, 2015.

CARVAJAL, Juan. CARMONA, Charlie. Gestión integral de residuos de construcción y demolición en Colombia: Una aproximación basada en la metodología del marco lógico. En: Producción + limpia. Vol. 11, No. 1. Enero-Junio 2016, P. 117-128.

CHIMAN, Larissa. SANABRIA, Luis. CHIMAN, Alexei. CORREA, Jhon. Caracterización comparativa de agregados obtenidos de rocas ígneas usados en construcción vial. En: Revista Infraestructura Vial. Vol. 16, No. 28. Oct, 2014. P. 05-12.

CASTAÑO, Jesús. MISLE, Rodríguez. RODRIGO, Andrés. LASSO, Leonardo. CABRERA, Adriana. OCAMPO, Manuel. Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. 2013.

DANE. Boletín técnico, Indicadores económicos alrededor de la construcción (IEAC). IV trimestre de 2018. Bogotá, Marzo de 2019.

E. Mejía, J. Giraldo, L. Martínez .Residuos de construcción y demolición. Revisión sobre su composición, impactos y gestión. En: Revista CINTEX, Vol. 18,2013. P. 105-130.

GOMEZ, A. FARIAS, M. Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y Demolición en la estructura de pavimento. En: XXVI reunión nacional de mecánica de suelos e ingeniería geotécnica. 2012.

GÓMEZ, Alejandra, FARIAS, Marció. 2012. Universidad de Brasilia. Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y demolición en la estructura de pavimento.

IACOBOAEA, Cristina. ALDEA, Mihaela. PETRESCU, Florian. construction and demolition waste - a challenge for the european union? En: Theoretical and Empirical Researches in Urban Management. Vol. 14. No. 1. February 2019. P. 30-52.

INV-E 201-13. Muestreo de agregados para construcción de carreteras.

INV-E 202-13. Reducción de muestras de agregado por cuarteo.

INV-E 213-13. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino.

INV-E 214-13. Determinación de la cantidad que pasa el tamiz No. 200 en los agregados pétreos mediante lavado.

INV-E 217-13. Densidad bulk (Peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto.

INV-E 218-13. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5mm (1 ½”) por medio de la máquina de los ángeles.

INV-E 222-13. Densidad, densidad relativa, gravedad específica y absorción del agregado fino.

INV-E 223-13. Densidad, densidad relativa, gravedad específica y absorción del agregado grueso. INV-E 230-13 Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras.

INV-E 238-13. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación utilizando el aparato micro-deval.

INV-E 240-13. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.

INV-E 245-13. Determinación de la resistencia del agregado fino a la degradación por abrasión utilizando el aparato micro-deval.

INV-E 701-13. Toma de muestras de materiales bituminosos.

INV-E 725-13. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta.

INV-E 732- 13. Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos.

INV-E 733-13. Gravedad específica Bulk y densidad en mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.

INV-E 744-13. Espesor o altura de especímenes compactados de mezclas asfálticas.

INV-E 748-13. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall.

INV-E 782-13. Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas.

INV-E 799-13. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente.

LASSO, A. MISLE, R. Evaluación Técnica, Económica e Institucional de la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en Bogotá D.C. Bogotá, 2012.

MONTGOMERY, C Douglas. Diseño y análisis de experimentos. México. D.F 2004. ISBN 968-18-6156-6.

PASADIN. GALLEGO. Stripping in hot mix asphalt produced by Aggregates from construction and demolition waste. En: Waste management & research. Vol. 30. No.1. Jan.2012.

PASADIN. PEREZ. Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste. En: Construction and Building Materials. Vol. 43, No.1. April.2013.

QUINTANA, H. LIZCANO, F. Pavimentos, Materiales, Construcción y Diseño. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2015. ISBN: 978-958-771-175-2.

QUIÑONES, F.S. Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Brasília, 2014. P.161. Tese de Doutorado.

Universidade de Brasília. FACULDADE DE TECNOLOGIA. Departamento de Engenharia Civil.

QUIÑONES, Ferney. Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Brasília. 193. 2014. Universidade de Brasília faculdade de tecnologia departamento de engenharia civil e ambiental.

RODRÍGUEZ, Ana. Sensibilidad al agua y propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con agregados reciclados de residuos de construcción y demolición. A Coruña, 2013, 343. Trabajo de grado. Doctoral. Universidad da Coruña. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Departamento de Métodos matemáticos y de representación.

ROPERO, W. GUZMAN, A. Caracterización físico-mecánica de los agregados pétreos en el municipio de Ocaña. Ocaña, 2014. P.155. Trabajo de grado. Ingeniero Civil. Universidad Francisco de paula Santander. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.

SÁNCHEZ DE JUAN, M. ALEJANDRO GUTIÉRREZ, P. 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycle concrete aggregate. Construction and Building Materials 23. P. 872-877.

SUMEDA, Paravithana. ABBAS, Mohajerani. Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. En: Resources, conservation & Recycling. Vol.48. No.1.Jul.2006.

V, Antunes. A C, Freire. L, Quaresma. R, Micaelo. Evaluation of waste materials as alternative sources of filler in asphalt mixtures. En: Materials and Structures. Vol 50. No. 254. Dec. 2017.

IDEAM. Promedios climatológicos 1981-2010. Disponible en:  
<http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima?fbclid=IwAR2rIBTkqT7u-Oyhldc-Kqn2e18ybACXUCfdUAvyknszX3-YHsoH5XUkMNA>

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. INVIAS. Normas para caracterización de materiales. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>.

MINISTERIO DE VIVIENDA. Guía para la elaboración del plan de gestión integral de los residuos de construcción y demolición (RCD) en obra. Bogotá, 2014. Disponible en:  
[http://www.minvivienda.gov.co/Documents/Gu%C3%ADa%20para%20la%20elaboraci%C3%B3n%20del%20plan%20de%20gesti%C3%B3n%20integral%20de%20residuos%20de%20construcci%C3%B3n%20y%20demolici%C3%B3n%20\(RCD\)%20en%20obra.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/Gu%C3%ADa%20para%20la%20elaboraci%C3%B3n%20del%20plan%20de%20gesti%C3%B3n%20integral%20de%20residuos%20de%20construcci%C3%B3n%20y%20demolici%C3%B3n%20(RCD)%20en%20obra.pdf)

SILVA, J, O. Tipos de agregados y su influencia en el diseño de mezcla del concreto. En línea. 13 de marzo de 2015. Disponible en:  
(<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto>).

# **ANEXOS**

**(VER CD ADJUNTO)**