

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ELABORADAS CON
RAP PROVENIENTE DE DESECHOS DEL INSTITUTO DE DESARROLLO
URBANO Y DE LA UNIDAD DE MANTENIMIENTO VIAL QUE ESTÁN SIENDO
APLICADAS EN VÍAS RURALES DE BOGOTÁ.

Estudio de caso

ROBINSON VILLAMIL ROJAS

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA DE INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2020

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ELABORADAS CON
RAP PROVENIENTE DE DESECHOS DEL INSTITUTO DE DESARROLLO
URBANO Y DE LA UNIDAD DE MANTENIMIENTO VIAL QUE ESTÁN SIENDO
APLICADAS EN VÍAS RURALES DE BOGOTÁ.

Estudio de caso

ROBINSON VILLAMIL ROJAS

Tesis de grado para optar al
Título de Maestría en Infraestructura vial

Director:

Doctor. ALVARO DE LA CRUZ CORREA ARROYAVE

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRÍA DE INFRAESTRUCTURA VIAL

BOGOTÁ

2020

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, septiembre 15 de 2020

Texto de dedicatoria

Este trabajo lo dedico especialmente a mi familia que con gran paciencia me ayudo y apoyó durante todo este proceso, a mis profesores y compañeros con los cuales pude caminar venciendo las adversidades y compartiendo los buenos momentos.

Agradecimientos

Debemos comenzar agradeciendo de manera especial a cada uno de los profesores que estuvieron a cargos de nuestra formación, gracias por los valiosos aportes que nos han sido fundamentales para desarrollar las actitudes de apoyo a la comunidad solucionando problemas que aportan factores de desarrollo social.

A todos los interesados que con su paciencia y apoyo dieron pie para asegurar una adecuada trasmisión de conocimiento y habilidades a permitir la evolución de una agradable carrera la cual permitirá que más hombres y mujeres den un aporte valioso al desarrollo y el mejoramiento en la calidad de vida de la sociedad.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS.....	18
OBJETIVO GENERAL.....	18
OBJETIVOS ESPECIFICOS	18
1. GENERALIDADES.....	19
1.1 ANTECEDENTES RESPECTO DEL ESTADO DEL ARTE	19
1.1.1. Colombia	19
1.1.2. Estados Unidos	20
1.1.3. Europa.....	21
1.1.4. Australia	22
2. CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ZONA DEL PROYECTO	23
2.1 LOCALIZACIÓN	23
2.2. CLIMATOLOGÍA.....	24
2.3. GEOLOGÍA.....	27
3. PARÁMETROS DE DISEÑO DE VIAS RURALES DE BAJOS VOLUMENES DE TRÁFICO Y EL MANEJO DEL RAP	29
3.2. TRATAMIENTOS GENERALES EN VÍAS RURALES	29
3.2.1. Afirmados.....	30
3.2.2. Tratamientos sobre suelos	30
3.2.3. Capas de estructura granular de soporte	30
3.3. TIPOLOGIAS DE TRATAMIENTOS ASIMILABLES CON RAP.....	31
3.3.1. Evaluación de calidad.....	32
3.4. RECICLAJE DE PAVIMENTO EXISTENTE	33
3.5. ASPECTOS BÁSICOS DE ESTABILIZACIÓN DE MATERIALES PARA CARRETERAS Y EL RAP.....	36
3.5.1. Estabilización del material con cemento hidráulico	37
3.5.2. Proceso de diseño PCA (Boletín 142)	37
3.5.3. Estabilización del material con cemento asfáltico	40
3.6. PARÁMETROS EMPLEADOS EN EL DISEÑO CON RAP	42
3.6.1. Calidad de los materiales de rap.....	42
3.6.2. Diseño de mezcla y fórmula de trabajo.....	45
3.7. CONCLUSIÓN DEL ANALISIS DE LA NORMA	47
3.7.1. Magnitud y tipología de la maquinaria establecida en la norma	47
3.7.2. Tipo de intervención establecida en la norma	48
3.7.3. La calidad de los materiales.....	48
3.7.4. Pertinencia de la norma	49
4. PROBLEMA PARA EL ESTUDIO DE CASO.....	50
4.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO	50
4.2. ANOMALIAS DETECTADAS EN LOS ESTUDIOS.....	52

4.3. ANOMALIAS EN OBRA.....	53
4.3.1. Ejecución del tramo de prueba	53
4.3.2. Patología de los tramos construidos	54
4.3.3. Descripción del aspecto inicial de los caminos a intervenir	57
4.3.4. Pavimentos de RAP existentes.....	59
4.3.5. Procesos constructivos anteriores a la gestión de cambios.....	60
4.3.6. Elaboración de las mezclas.....	60
4.4. ENSAYOS MEZCLAS INSTALADAS.....	62
4.4.1. Resultados de ensayos	63
4.4.2. Conclusión de esta fase de prospección	64
5. DESARROLLO DE LA GESTIÓN DE CAMBIOS DEL PROYECTO FASE I	66
5.1. LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA GESTIÓN DE CAMBIOS	66
5.1.1. Actividades preliminares	66
5.1.2. Muestreos de materiales de RAP	66
5.1.3. Tratamiento de los resultados.....	67
5.1.4. Las mezclas y su aplicación.....	67
5.2. TRABAJO DE LABORATORIO.....	67
5.2.1. Gradación y encaje de los materiales.....	70
5.2.2. Porcentajes de mezcla	72
5.2.3. Criterios de diseño.....	72
5.2.4. Diseño mezcla básico.....	73
5.2.5. Diseño de mezcla 20% IDU	76
5.2.6. Diseño de mezcla 20% UMV.....	76
5.2.7. Conclusiones de los diseños de mezclas	77
5.2.8. Parámetro de resistencia seca y resistencia conservada	78
5.2.9. Diseño final adoptado.....	80
5.3. TRABAJOS DE CAMPO FASE I.....	80
5.3.1. Criterios de instalación de las mezclas	81
5.3.2. Evaluación de la mezcla en los primeros tramos	85
5.3.3. Desarrollo del curado	89
6. SEGUIMIENTO AL PAVIMENTO CON DOS AÑOS DE CONSTRUCCIÓN	91
6.1. EVALUACIÓN SUPERFICIAL.....	91
6.1.1. Resultados de la inspección visual	91
6.1.2. Factores índices	94
6.2. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.....	97
6.2.1. Extracción de núcleos	97
6.2.2. Caracterización deflectométrica.....	98
6.3. MODELACIÓN DEFLECTOMÉTRICA.....	104
6.3.1. Cuencos característicos.	107
6.4. PROCESO DE RETROCÁLCULO DIRECTO	108
6.4.1. Fundamentos del retro cálculo	109
6.4.2. Módulo de la capa de RAP.....	111
6.5. CÁLCULO DE LA VIDA RESIDUAL DE LA CAPA DE RAP	112

6.5.1. Estructura No. 1.....	112
6.5.2. Estructura No. 2.....	114
7. APLICACIÓN LOCALIDAD DE USME.....	116
7.1. GESTIÓN INICIAL	116
7.2. PROCESO DE COSTRUCIÓN.....	117
7.2.1. Mezcla con RAP	118
7.2.2. Extendido, conformación y compactación	119
7.2.3. Proceso de curado	119
7.2.4. Lechada asfáltica.....	120
8. ESPECIFICACION PARTICULAR RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRIO EMPLEANDO LIGANTES ASFÁLTICOS E HIDRÁULICOS.....	122
8.2. MEZCLA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO, TRASPORTADO, ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFALÁTICA Y CEMENTO PORTLAND EN SITIOS DISTINTOS AL DE SU DISGREGACIÓN.....	122
8.2.1. Descripción	122
8.2.2. Materiales	123
8.2.3. Equipo.....	125
8.2.4. Ejecución de los trabajos	125
9. ASPECTOS ECONÓMICOS	129
9.1. BENEFICIOS	129
9.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	132
9.2.1. Parámetros generales de análisis	132
9.2.2. Análisis técnico de acuerdo a las estructuras comparadas	135
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	140
10.1. CONCLUSIONES.....	140
10.2. RECOMENDACIONES	142
10.3. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	143
11. BIBLIOGRAFIA	145
11. ANEXOS	150
11.1. ANEXO 1. SOPORTES DE PARTICIPACIÓN	150
11.2. ANEXO 2. ENSAYOS DE LABORATORIO	150

LISTA DE FIGURAS

	Pg.
Figura 1. Localización de las vías intervenidas con RAP.	23
Figura 2. Cuencas hidrológicas.	24
Figura 3. Distribución de temperaturas medias multianuales.	25
Figura 4. Paisaje de zonas altas de montaña y páramo.	25
Figura 5. Precipitaciones medias multianuales, proyectadas a 30 años.	26
Figura 6. Mapa de elevaciones.	27
Figura 7. Mapa geológico general de la zona del proyecto.	28
Figura 8. Ciclo de producción de un reciclaje de pavimento existente.	33
Figura 9. Registro fotográfico comparativo.	35
Figura 10. Curva esfuerzo – deformación y módulo de reacción del suelo.	
Ensayo de placa.	39
Figura 11. Cantas de diseño PCA.	39
Figura 12. Gradaciones materiales asociados con el RAP.	42
Figura 13. Estructura con RAP estabilizado con emulsión asfáltica.	52
Figura 14. Defectos de la mezcla	56
Figura 15. Condición inicial de las vías.	58
Figura 16. Pavimentos de RAP construidos anteriormente.	59
Figura 17. Materiales de soporte del RAP.	60
Figura 18. Colocación del material estabilizante del RAP.	61
Figura 19. Mezcla en vía mediante motoniveladora.	61

Figura 20. RAP antes y después de la mezcla.	61
Figura 21. Núcleos tomados en vía.	62
Figura 22. Aspecto de la mezcla en el exterior y en el interior.	62
Figura 23. Mezcla luego de curada.	63
Figura 24. Granulometrías medias de los materiales recuperados.	64
Figura 25. Muestra de RAP con diámetro máximo de 1".	68
Figura 26. Partículas del RAP.	68
Figura 27. Ensayos de separación de granulares y bitumen del RAP.	69
Figura 28. Granulometrías del RAP del IDU y la UMV	71
Figura 29. Diseño inmersión compresión RAP – UMV con cemento y emulsión	75
Figura 30. Diseño inmersión compresión RAP – IDU con cemento y emulsión.	76
Figura 31. Espesores y dosificaciones finales de construcción	80
Figura 32. Proceso de mezcla en patio.	82
Figura 33. Aprovechamiento del RAP en Estados Unidos	83
Figura 34. Almacenamiento del RAP.	84
Figura 35. Porcentaje de RAP Vs Grado PG del cementante	85
Figura 36. Instalación de la mezcla.	88
Figura 37. Aspectos del desarrollo del curado de la mezcla	89
Figura 38. Aspecto final del pavimento (1) y su contraste con un pavimento convencional (2).	90
Figura 39. Patologías de daño superficial.	92
Figura 40. Graficas de dispersión de los datos.	94
Figura 41. Perdida de ligante.	95

Figura 42. Aspecto general de la regularidad superficial del pavimento.	96
Figura 43. Proceso de extracción de núcleos.	97
Figura 44. Ensayos de deflectometría.	98
Figura 45. Gráfico diferencias acumuladas método AASHTO - 93.	103
Figura 46. Gráfico de deflexiones y radios de curvatura.	104
Figura 47. Datos de entrada programa DEFLEX – IMPACO.	105
Figura 48. Graficas de sectorización, DEFLEX – IMPACO.	106
Figura 49. Resultados de modelación sectorización, DEFLEX – IMPACO.	107
Figura 50. Portada de entrada e ilustración del programa Everstress 5.0.	109
Figura 51. Esquema general de modelación, Everstress 5.0.	110
Figura 52. Malla de comportamiento deflectométrico.	110
Figura 53. Modelación estructura 1.	113
Figura 54. Resultados estructura 1.	113
Figura 55. Modelación estructura 2.	114
Figura 56. Resultados estructura 2.	115
Figura 57. Actividades preliminares Usme.	117
Figura 58. Proceso de mezcla en patio.	118
Figura 59. Espesores de diseño Localidad de Usme.	118
Figura 60. Extendido, conformación y compactación.	119
Figura 61. Curado y re-compactación.	120
Figura 62. Pavimento de RAP con lechada asfáltica.	121
Figura 63. Grafica de costo Km - periodo de estabilidad.	133
Figura 64. Modelación número estructural.	136

LISTA DE TABLAS

	Pg.
Tabla 1. Combinaciones de capas Tipo T1 – T2.	32
Tabla 2. Características de los materiales para Bajos Volúmenes de tránsito (NT1).	36
Tabla 3. Valores medios de soporte del suelo PCA	38
Tabla 4. Gradación de materiales tratados con emulsión.	41
Tabla 5. Requisitos de calidad emulsión para mezclar con agregados.	41
Tabla 7. Requisitos de calidad agregados.	43
Tabla 8. Composición diseños básicos IDU y UMV.	74
Tabla 9. Datos de los resultados de los diseños IDU y UMV.	77
Tabla 10. Datos y gráficos de los resultados totales.	81
Table 11. Tabla de datos de la inspección de daños.	92
Tabla 12. Tabla de ensayos de deflectometría.	101
Tabla 13. Sectorización diferencias acumuladas método AASHTO - 93.	103
Tabla 14. Resultados retro cálculo directo.	108
Tabla 15. Rigidez en función de temperatura y velocidad de aplicación de carga.	111
Tabla 16. Denominación de las capas asfálticas construidas con reciclaje.	123
Tabla 17. Franja granulométrica de agregados producto de reciclaje y encaje.	123
Tabla 18. Franja granulométrica de agregados producto de reciclaje.	126
Tabla 19 Análisis de beneficios tecnología del RAP.	130
Tabla 20 Matriz de compasión y costo por kilómetro de vía.	133
Tabla 21 Tabla de resultados de conteos de tránsito	135
Tabla 22 modelación espesores equivalentes	137
Tabla 23 Matriz de comparación por alternativas.	139

RESUMEN

En este documento se exponen los resultados de un estudio de caso en el que se aplicó residuos de pavimento asfáltico (RAP) para hacer el mantenimiento de algunos tramos de la Red Vial rural de las Localidades de Sumapaz y Usme en la Ciudad de Bogotá.

El proceso se inicia con la auscultación realizada sobre algunos sectores que presentaron fallas prematuras a los cuales se les efectuó una inspección visual, análisis de laboratorio, así como, ajustes en la elaboración de las mezclas y en los procesos de construcción

El fundamento teórico de los análisis se realizaron con los procedimientos establecidos en las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías INVIAS, del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, las normas de ensayo de materiales de estas dos entidades y documentación disponible de entidades internacionales de carreteras como el Departamento de Transportes de los Estados Unidos, de los Estados de Minnesota y algunas investigaciones realizadas por varias universidades del país.

Los diseños y procesos ajustados fueron aplicados sobre los tramos no intervenidos y al cabo dos (2) años con la exposición al medio ambiente y al tráfico se realizaron las respectivas evaluaciones de las características mostradas visualmente, con algunos núcleos y se midió la condición mecánica remanente de la mezcla a través de deflexiones de Viga Benkelman con sus respectivos análisis con modelación DEFLEX – IMPACO y EVERSTRESS.

Con estas experiencias se realizaron nuevos pavimentos, esta vez en la Localidad de Usme donde se incorporó un mejoramiento con micro pavimento.

Palabras claves: RECICLEJE, RAP, PAVIMENTOS

SUMMARY

This document presents the results of a case study in which asphalt pavement residues (RAP) were applied to maintain some sections of the rural road network in the towns of Sumapaz and Usme in the City of Bogotá.

The process begins with the auscultation carried out on some sectors that presented premature failures to which a visual inspection, laboratory analysis, as well as adjustments in the preparation of the mixtures and in the construction processes were carried out.

The theoretical basis of the analyzes were carried out with the procedures established in the General Construction Specifications of the Instituto Nacional de Vías INVIAS, of the Urban Development Institute - IDU, the material testing standards of these two entities and documentation available from international entities of roads such as the Department of Transportation of the United States, the States of Minnesota and some research carried out by several universities in the country.

The adjusted designs and processes were applied to the non-intervened sections and after two (2) years with exposure to the environment and traffic, the respective evaluations of the characteristics shown visually were carried out, with some cores and the remaining mechanical condition was measured. of the mixture through Benkelman beam deflections with their respective analysis with DEFLEX - IMPACO and EVERSTRESS modeling.

With these experiences, new pavements were made, this time in the town of Usme where an improvement with micro pavement was incorporated

Keywords: RECYCLING, RAP, PAVEMENTS

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, entidades como el Instituto Nacional de Vías - INVIAS, el Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, la Unidad de Mantenimiento Vial – UMV, así como algunas secretarías departamentales, siguiendo la tendencia de protección al medio ambiente, han venido involucrando de manera paulatina el uso de materiales de reciclaje dentro de las estructuras de pavimento. De la misma forma y siguiendo esta tendencia, la academia se viene interesando en el tema y propone sus propios trabajos para la gestión de los residuos. Esta investigación se dio debido a una gestión de cambios efectuada sobre intervenciones viales deficientes en las vías rurales de la Localidad de Sumapaz y que en virtud de sus buenos resultados se extendió a la Alcaldía Menor de Usme.

Este informe, realizado por el autor, es el resultado de un trabajo detallado acerca del manejo del reciclaje de pavimentos flexibles, conocido como RAP (recycled asphalt pavement) obtenido a partir de la disgregación de las estructuras deterioradas de concretos asfálticos. Se compone básicamente de dos etapas; la primera desarrollada en el año 2017, se refiere a la mencionada gestión de cambios sobre una estabilización con RAP y la segunda, año 2019, corresponde a la evaluación de los resultados aplicados de la etapa anterior, así como un desarrollo posterior en Localidad de Usme donde se aplicó un proceso similar con algunas mejoras. Inicialmente se tomaron de base cuatro (4) de los 8 kilómetros iniciales y para Usme cerca de cinco (5) kilómetros, para un total de nueve (9) kilómetros intervenidos.

El proceso de trabajo incorpora resultados de inspecciones de campo, análisis de información existente de los tramos fallados, elaboración de ensayos de laboratorio, ajustes a diseños de mezcla, recomendaciones en los procesos constructivos, construcción de tramos de prueba y aplicación de los resultados en obra. Posteriormente se efectuaron evaluaciones visuales y físicas de la vía tomada como referencia, evaluación de resultados para finalmente desarrollar un proceso similar con algunas mejoras buscando incorporar criterios al estado del arte respecto de esta tecnología.

Por lo anterior, la pregunta que fundamentó en núcleo del trabajo realizado por el autor, luego dos (2) años de puesta al servicio del tramo tomado como referencia para el estudio de caso fue: ¿mejoró la calidad de la mezcla?

El documento se estructura de la siguiente forma: En un primer capítulo se registran algunas generalidades relacionadas con la aplicación del RAP como material de construcción de pavimentos, se hace una revisión de metodologías de algunos estados de los Estados Unidos y se hace mención de las aplicaciones en la Unión Europea, Australia y Colombia.

En un segundo numeral se hace la caracterización general de la zona de proyecto, los factores locales en cuanto a clima, la geología, hidrología y demás elementos

que de alguna forma tienen incidencia sobre el comportamiento de las estructuras de pavimento.

En un tercer capítulo se examinarán los parámetros técnicos de trabajo, la metodología y normativa usualmente utilizada para enfrentar proyectos relacionados con vías rurales y pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y la normativa nacional que enmarca al RAP como una alternativa viable a ser aplicada en este tipo de estructuras.

En un cuarto capítulo se podrá observar el resumen general del estudio de caso, la primera fase de la investigación, los procedimientos de diseño y la metodología de construcción dentro de los diferentes frentes de trabajo en las veredas en que se aplicó el material de reciclaje y los factores funcionales, ambientales y estructurales que fueron tomadas de base para la evaluación del comportamiento de las mezclas falladas y los respectivos procesos constructivos.

En un quinto capítulo, trabajos de campo y de oficina se hace una descripción de los procesos que se desarrollaron para el ajuste y las correcciones de diseño con las cuales se construirían los diferentes tramos de la malla vial de Sumapaz y específicamente el tramo de cuatro (4) kilómetros que posteriormente sería evaluado.

En el capítulo seis, segunda etapa de la investigación establece la evolución de los resultados luego de dos (2) años de puesta al servicio de la vía en la Localidad de Sumapaz, correspondiente a la Vía Granada – El Tunal, Corregimiento San Juan. En este aparte del trabajo se observan las condiciones superficiales de la estructura y el inventario general de fallas, con forme a la metodología de rehabilitación de INVIAS, en lo que hace referencia a la inspección visual. Se describe los resultados de los ensayos de deflectometría mediante el equipo de laboratorio “Viga Benkelman” y la modelación de los mismos a través de los programas IMPACO y Everstress 5.0., con los cuales se estimó, mediante retro cálculo, los respectivos módulos de los materiales tratados y la sub rasante del proyecto.

En el séptimo capítulo se involucra la gestión realizada sobre la malla vial de la Localidad de Usme, aplicando las experiencias encontradas en la etapa inicial de la investigación e introduciendo algunas mejoras producto de las evaluaciones de la etapa 2 de la investigación, con resultados favorables desde el punto de vista visual y que se esperaba que a futuro diera se pudiera evaluar las variaciones que se dieron con dichas mejoras.

El octavo capítulo propone una norma dirigida exclusivamente a la aplicación del reciclado de pavimentos asfálticos en vías de bajos volúmenes de tránsito mitigando algunas de las limitaciones encontradas en la investigación, que deberían ser ajustadas a las circunstancias relativas a este tipo de vías.

El texto describe de manera implícita un cronograma de acción en el cual se observa que en una primera etapa (año 1) se hacen los análisis del problema o del estudio de caso, se activa un esquema de trabajo y se dan lineamientos de acción. Luego (años 2 y 3) se da espera para a que transito e intemperie sometan a las

mezclas a las acciones de desgaste y finalmente (año 4), se evalúan resultados y se realizan ajustes y aplicaciones nuevas aplicando el conocimiento adquirido.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el comportamiento de mezclas elaboradas con RAP proveniente de desechos de obras de IDU y UMV con diferente proporción de adiciones, para ser usadas en vías de bajos volúmenes de tránsito en la malla vial local de Sumapaz y Usme de la Ciudad de Bogotá.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recolectar información de campo asociada con los pavimentos en la Localidad de Sumapaz que dieron pie para el estudio de caso.
- Efectuar esquema de ensayos de caracterización de materiales y analizar los diseños que sustentaron la elaboración de las mezclas asfálticas con RAP.
- Proponer alternativas de diseño y actividades de campo que permitan mejorar los parámetros de calidad de las mezclas.
- Realizar la respectiva evaluación de los resultados de los materiales y diseños propuestos en el caso estudiado.
- Desarrollar recomendaciones a partir de las alternativas formuladas para la aplicación de RAP en las localidades de Sumapaz y Usme.
- Sugerir un ajuste de las normas actuales de manejo de RAP a nivel del Distrito Capital y de las normas nacionales específicamente para las mezclas en frío.

1. GENERALIDADES

La construcción de vías terrestres involucra el consumo de millones de toneladas de materiales provenientes de cantera a cielo abierto, para su transformación es necesario el consumo de energía en sus diferentes formas convirtiéndose en una de las actividades más perjudiciales para el medio ambiente. De acuerdo con las estadísticas del Departamento Nacional de Estadística DANE, la inversión en carreteras se ha mantenido en crecimiento desde el año 2012 y en conjunto con el sector transporte su aporte al Producto Interno Bruto PIB oscila entre el 1 y 2%. En cuanto al consumo de materiales de cantera, el último decenio ha crecido a un ritmo de 4% anual lo que indica que para el año 2013 alcanzará casi 46 millones de toneladas al año, de las cuales cerca del 20% corresponde a carreteras, generando, en forma global, un consumo por habitante de 2,56 toneladas, con forme a las estadísticas de la Unidad de Planeamiento Minero Energético PIME.

El concreto asfáltico utilizado en la cobertura de los pavimentos de las vías y calles de todas partes del mundo, incluyendo nuestro país, pertenece a esta gama de materiales y de manera adicional conlleva el uso de otros elementos de acentúan el impacto ambiental por los procesos de producción de los agentes cementantes. El aprovechamiento de los desperdicios del pavimento resulta ser una actividad positiva para mitigar este tipo de explotaciones.

El residuo de la disgregación de la carpeta asfáltica, se realiza mediante fresadoras y recicladoras de caminos y su producto final es el RAP el cual cuenta con los agregados de buena calidad con cambios mínimos en su composición ya que es el bitumen que recibe en mayor grado el envejecido y la fatiga.

1.1 ANTECEDENTES RESPECTO DEL ESTADO DEL ARTE

Veamos a continuación algunas de las aplicaciones que se tiene actualmente en los diferentes países y los antecedentes de las mismas.

1.1.1. Colombia

El tratamiento del reciclaje en nuestro país es relativamente nuevo, solo hasta hace unos años las entidades estatales de orden nacional y distrital, especialmente INVIAS, IDU y la Unidad de Mantenimiento Vial del Distrito Capital han venido implementando políticas de utilización de material de reciclaje en sus procesos de construcción.

Desde el punto de vista académico, existen trabajos que recopilan información de laboratorio, trabajos de campo con algunos usos específicos asociadas a las aplicaciones establecidas en las normas de orden nacional.

2011. Instituto de Desarrollo Urbano IDU. A partir de los parámetros ambientales establecidos en la Resolución 2393 y 6891 de 2011, de la Secretaría Distrital de Ambiente, se decide aplicar, dentro de los pavimentos de la Ciudad de Bogotá, el Grano de caucho reciclado (GCR) y el pavimento reciclado (RAP), Reciclad asphalt Pavement, a través de lo cual se estima un % superior a 10% de RAP del total de metros cuadrados y más del 5% de GCR, incrementando, como política de aplicación, 5% anual hasta llegar al 25%. Dentro de la misma iniciativa se buscaba que los productos de fresado se mezclaran con emulsión asfáltica para obtener una base o sub base mejorada.

2011. Reyes, Camacho y otros, Elaboraron un estudio para la determinación del comportamiento de las mezclas asfálticas del Instituto de Desarrollo Urbano con adición de pavimento reciclado.

2012. Se incorpora la Norma INV E-812 – 13. Para la determinación de la proporción y del grado del agente de reciclado en mezclas de concreto asfáltico elaboradas en caliente con material reciclado.

2014. Hernández, En este trabajo se exponen una evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas.

1.1.2. Estados Unidos

Las agencias de los Estados Unidos cuentan con desarrollos con más de cincuenta años sobre el RAP, en la mayoría de los casos los porcentajes no superan el 30% y se hacen usualmente sobre mezclas en caliente en las cuales los materiales reciclados son adicionados y calentados junto con los agregados granulares.

2009, The Colorado Department of Transportation (CDOT), hace un análisis del uso de pavimento asfáltico recuperado (rap) como material bases de carreteras. El CDOT ha aplicado en diferentes proyectos los materiales recuperados de pavimentos deteriorados, haciendo los análisis de laboratorio respectivos se pudo establecer que existen ciertas relaciones entre los materiales recuperados y los materiales vírgenes y se toman como base las especificaciones para materiales convencionales del CDOT.

2011. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Pavimento asfáltico recuperado en mezclas de asfalto. Estado de la práctica. Se establecen los resultados de las evaluaciones de los pavimentos que contienen hasta el 30% de RAP y comparado con las mezclas convencionales.

2015. National Asphalt Pavement of Association. Información series 139. Se hace una descripción de la industria de los pavimentos del Japón por el equipo de profesionales de los Estados Unidos en 2014, dentro de esta caracterización se indagó acerca de la aplicación de empleo de RAP con porcentajes mayores al 25% y los procedimientos para mantener la calidad de las mezclas con estas adiciones y se establecen las recomendaciones aplicables a los Estados Unidos.

2016. The Minnesota Department of Transportation, Synopsis of recycled asphalt pavement (RAP) material. Se hace una descripción general de los parámetros con que actualmente el Estado de Minnesota, en USA, emplea los materiales reciclados para pavimentación de carreteras, para esta agencia gubernamental americana los procesos de reciclaje ya no son un tema de fase experimental, sino que existen reglas claras y normas que determinan los lineamientos de aplicación de esta tecnología.

1.1.3. Europa

Estos países cuentan con una trayectoria cercana a los 40 años de uso del pavimento recuperado para producción de mezclas nuevas, la investigación de esta línea de materiales está a cargo de la Comisión Europea del Asfalto y al igual que nosotros, lo que se quiere es que estas mezclas recuperadas tengan una mayor aplicación en pavimentos nuevos atenuando las aplicaciones de pavimentos en caliente y con el uso de aditivos facilitadores de la mezcla. La mayor parte de las redes viales europeas están construidas con pavimento asfáltico.

2013. Investigación Re-Road. Desarrollo del conocimiento y la tecnología para mejorar la vida útil de las estructuras de pavimento, aumentando el ciclo de vida de las carreteras y mitigando los residuos sólidos generados en los procesos. Se buscaron estrategias de obtención del residuo en forma adecuada, manejo del mismo, caracterización y procesamiento de datos, rentabilidad ambiental y económica de los procesos y procesos de industrialización y adición del asfalto recuperado (AR).

Se realizaron cambios y evaluaciones de la norma existente ya que no cumplían con los Requerimientos específicos del material, normas EN 12697-1 y EN 12697-3, fueron re evaluadas. Para los procesos de análisis de laboratorio se establecieron ensayos específicos que determinaron las cualidades fisicoquímicas de los asfaltos envejecidos y la solicitud de adiciones.

El resultado fue encontrar la probable vida útil del reciclado conociendo, contenido de carbonilos y el módulo complejo a 25°C (1,6Hz) y 52°C (10 Hz), vinculado al endurecimiento del bitumen. La caracterización del agregado involucro gradaciones. Posteriormente se elaboraron mezclas y combinaciones con materiales de adición. En todo este tipo de actividades un factor que debe resaltarse es que los productos que se analizan y a los que se llega se les hace el seguimiento respecto del impacto ambiental que puedan tener en su entorno.

2020 . La Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos (AEPA), estableció un aumento del uso del RAP siendo el 2018 el periodo con mayor uso de este material, sin embargo, con la crisis económica europea, estos valores han bajado. De acuerdo con esta entidad la producción de asfalto en caliente en los últimos 4 años fue de 240 toneladas en promedio para los 28 países de la Unión Europea. De estas cantidades el 20% provino de reciclaje y de esta cantidad el 76% se usó para capas nuevas de asfalto, el resto en capas de base y otras aplicaciones de Ingeniería Civil.

1.1.4. Australia

El instituto encargado de los trabajos de infraestructura es el IPWEA – Institute of Public Works Engineering Australasia.

2010. – Institute of Public Works Engineering Australia, NSW Division, Specification for Supply of Recycled Material, for Pavement, Earthworks and Drainage, 2010. Es la especificación que fue publicada en el 2003 y busca el aprovechamiento de los residuos de asfalto en trabajos de pavimentación.

2019. Se ejemplariza el uso del RAP, en una ciudad de Australia (Adelaida), pavimento sus calles con 100% de material reciclado tipo RAP y aceite vegetal. Se recuperaron los materiales de las carpetas asfálticas locales deterioradas a través de una fresadora, se caracterizó y diseñó la mezcla adicionándole rejuvenecedor y aceites para colocar en caliente.

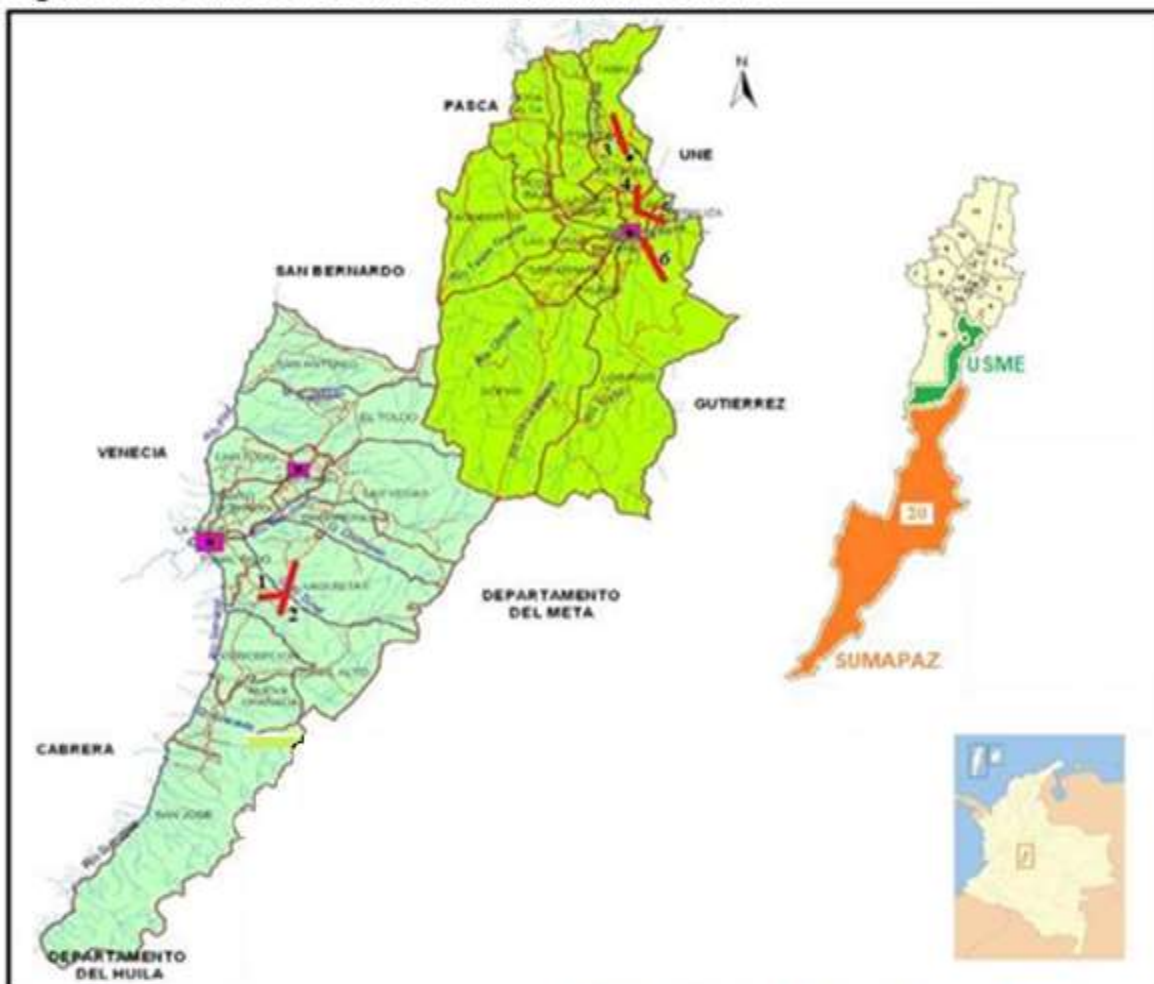
2020. La Junta de Investigación de Carreteras de Australia, cuenta con una línea de investigación específica para los pavimentos reciclados incorporando, adicionalmente desechos de diferente índole dentro de os materiales de construcción de las carreteras.

2. CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ZONA DEL PROYECTO

2.1 LOCALIZACIÓN

La zona del proyecto se encuentra localizado en el área rural del sur de la Ciudad de Bogotá, Figura 1, muy cerca de la reserva natural del Páramo de Sumapaz, está constituido por seis (6) corredores viales que forman parte de la red de la Localidad 20. Es preciso mencionar que con forme con la misma figura se incorporan diez (10) corregimientos de la localidad de Usme, al norte de la anterior, pero con similares condiciones medio ambientales.

Figura 1. Localización de las vías intervenidas con RAP



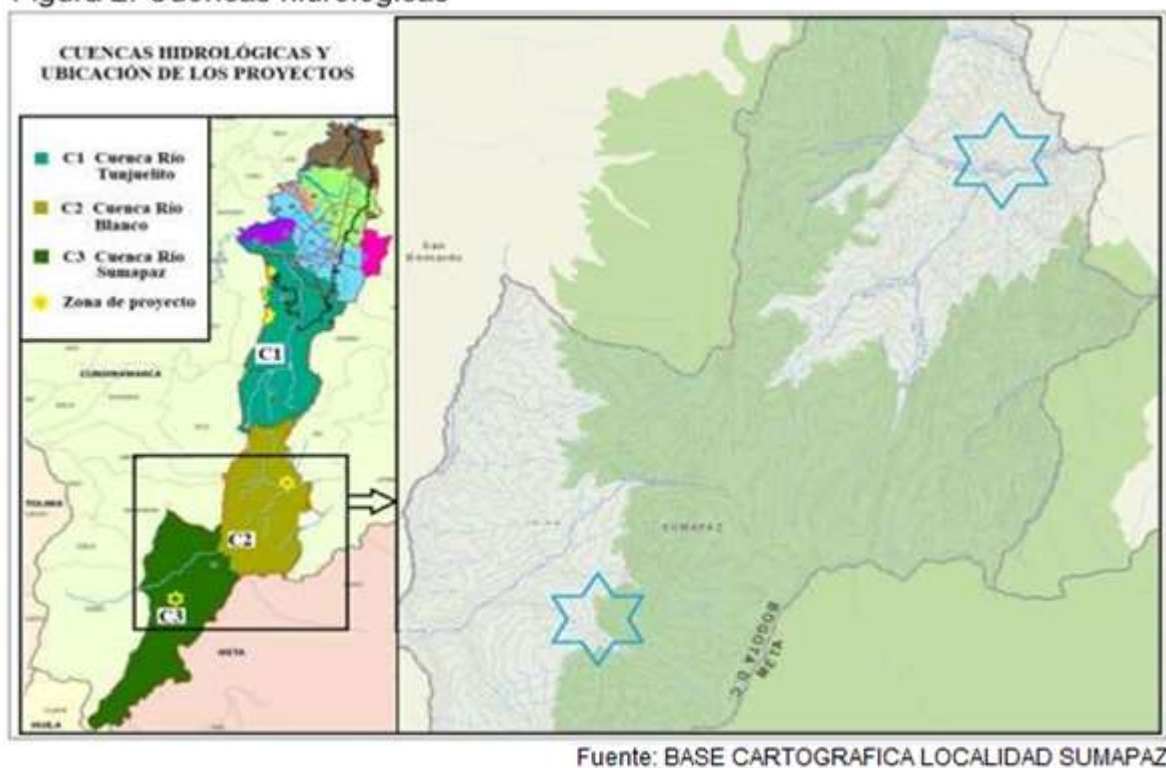
Fuente: BASE CARTOGRAFICA LOCALIDAD SUMAPAZ

2.2. CLIMATOLOGÍA

Estas localidades se caracterizan por formar parte de las áreas rurales del sur de la Capital de la República, de allí provienen buena parte de los alimentos que se consumen en Bogotá, tales como papa, maíz, lácteos y demás. Es una región montañosa con un alto poder hídrico. Se ubica sobre la Cordillera Oriental, justo en el centro del Macizo de Sumapaz al sur de la Capital, clasificada como una zona de piso alto andino dentro de las regiones fisiográficas del Departamento de Cundinamarca está bañadas por las cuencas hidrográficas de los ríos Tunjuelito, Blanco y Sumapaz.

Los proyectos de que trata este trabajo pertenecen a estas dos últimas y como puede observarse en el mapa de la Figura 2, por sus circunstancias topográficas, hidrológica, de suelos y fundamentalmente tratarse de una zona de reserva natural debe ser tratada de manera especial.

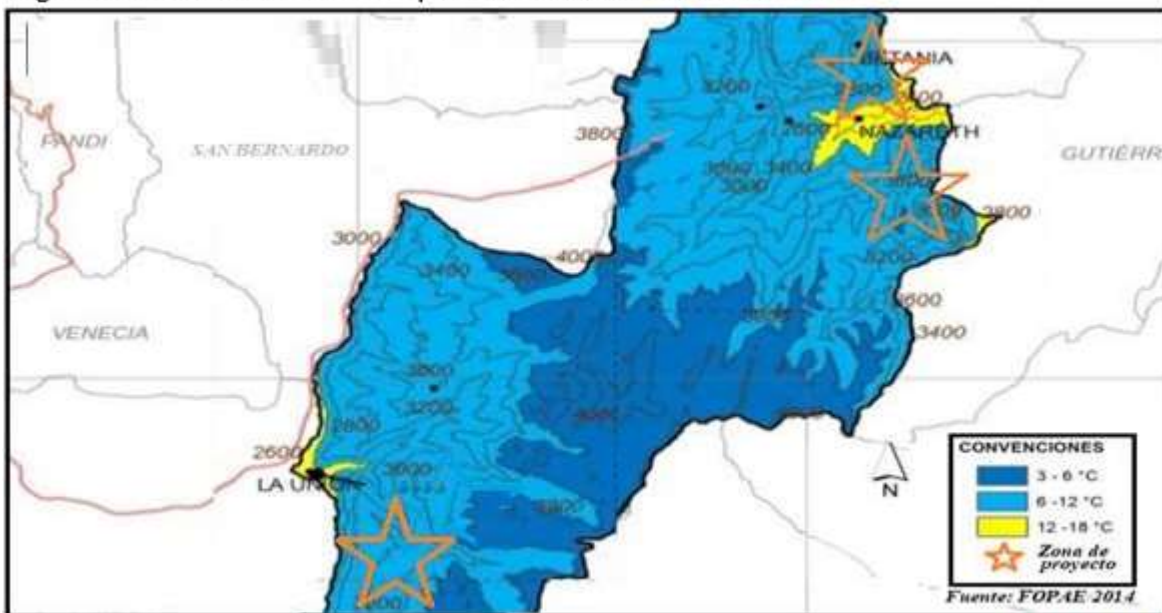
Figura 2. Cuencas hidrológicas



En el mapa de la Figura 3 se observan las cuencas altas de los Ríos Blanco y Sumapaz en cuyos sectores se encuentran las zonas intervenidas con carreteras construidas con RAP.

Se trata de climas extremos sobre alturas medias sobre el nivel del mar que varían entre los 2600 y 3600 msnm con temperaturas promedio que oscilan entre 3° y 12°C.

Figura 3. Distribución de temperaturas medias multianuales



Fuente: IDEAM

La Figura 4 deja ver el tipo de paisaje y a pesar de que las medias de temperatura se oscilan entre 5 - 8°C, en la madrugada o la noche pueden ser menor a 0°C.

Figura 4. Paisaje de zonas altas de montaña y páramo



De acuerdo con los modelos de precipitación del IDEAM, Figura 5, del periodo 1970 al año 2010, se observan medias de precipitaciones anuales, de tal forma que las isoyetas del sector fluctúan entre los 1000 y 2000 mm al año siendo las mayores aquellas que se encuentran al sur del proyecto.

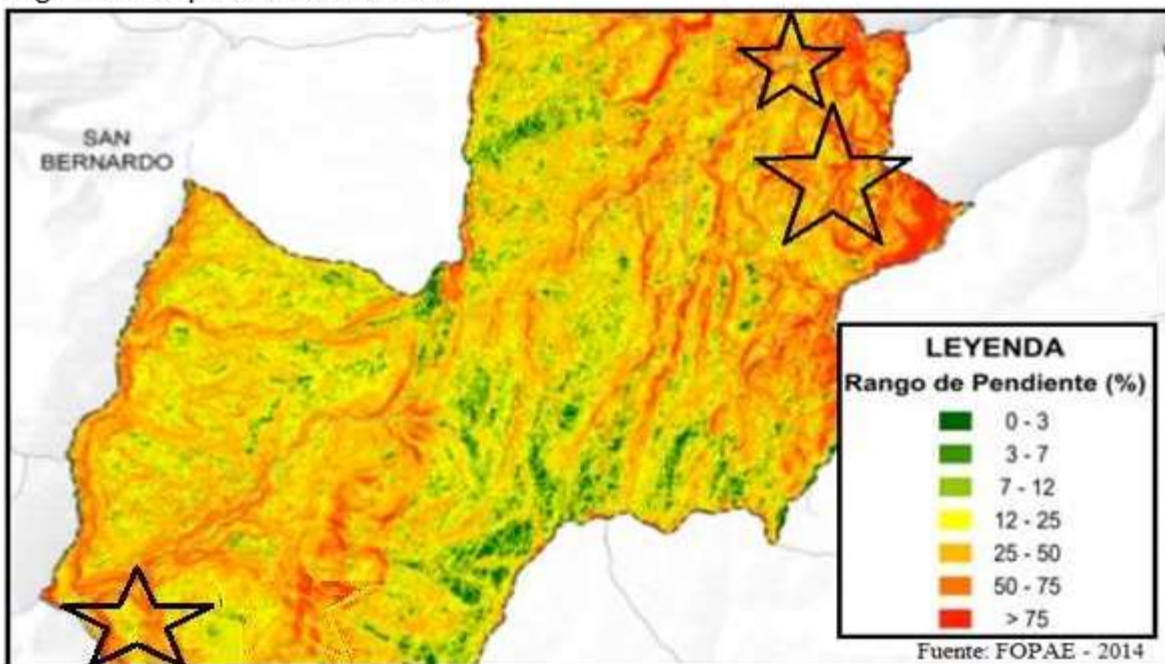
Figura 5. Precipitaciones medias multianuales, proyectadas a 30 años



Los registros meteorológicos de las estaciones del IDEAM, tomados de base por el FOPAE, en el 2014, para la Alcaldía Mayor de Bogotá, la humedad relativa de la zona del proyecto es bajo con respecto a los registros multianuales de los alrededores, su valor medio es de 60%.

En el gráfico de la Figura 6, también tomado de los mapas de este estudio del FOPAE, se observa la magnitud de las elevaciones de los cerros por donde se han construido las vías.

Figura 6. Mapa de elevaciones



En el mapa se puede apreciar la magnitud de las pendientes de las laderas que se encuentran en los proyectos, esto tiene un efecto importante en la estabilidad, en especial si se combinan las circunstancias de la tipología de los suelos y las circunstancias hidro geológicas asociadas a las obras, con pendientes superiores a 75%, por lo anterior las medidas de mitigación y el manejo de drenaje es fundamental en las obras lineales.

2.3. GEOLOGÍA

La parte central de la Localidad de Sumapaz, que es precisamente donde se efectuaron los primeros trabajos de construcción vial, forma parte de la zona montañosa del centro de la Cordillera oriental y como en reborde llanero discurren toda una serie de condiciones geológicas que han caracterizado la conformación de las elevaciones de la cordillera y que nacen, precisamente de la historia de la relación entre la placa suramericana y los Andes.

Veamos a continuación en la Figura 7, algunas de las características de la geología general de la zona del proyecto, de su geomorfología ya que esta condición establece ciertos criterios que deben ser considerados al momento de desarrollar cualquier tipo de proyecto de infraestructura.

3. PARÁMETROS DE DISEÑO DE VÍAS RURALES DE BAJOS VOLUMENES DE TRÁFICO Y EL MANEJO DEL RAP

La mayor parte de las vías rurales de Colombia se encuentran sobre las montañas, montañas que en cuanto hace referencia a la geología, son de formación reciente, rocas diaclasadas en las partes altas combinadas con coluviones de matriz limosa, arcillosa o arenosa, igualmente laderas de suelos sueltos que usualmente provocan desprendimientos y movimiento fruto de la juventud geológica de los Andes.

Según las estadísticas del Banco Mundial cerca del 90% de la red vial forma parte de la red terciaria y para el BID, Colombia cuenta con algo más de 206,700 kilómetros de carreteras con una densidad de 530 kilómetros por millón de habitantes, menos de la mitad de países como Brasil o México, de esta densidad vial cerca de 142,284 kilómetros son vías terciarias y solo el 18% de ellas están en buen estado. en un precario estado. Una iniciativa de gran impacto, al menos en las vías cercanas a los centros poblados sería el uso del RAP para mitigar esta condición y mantener un adecuado nivel de servicio por periodos de tiempo más prolongados.

Desde el punto de vista de los procesos de tratamiento de las vías rurales, la normativa colombiana cuenta con especificaciones y manuales propios de volúmenes de baja intensidad y de alguna forma se especifican procesos y materiales para la intervención de corredores viales de carreteras de tercer orden, que es precisamente el ámbito en el cual se dio el desarrollo de la presente investigación.

En este capítulo se hace una descripción general de los parámetros con los cuales se efectúan intervenciones en vías de bajo nivel de tránsito, se extraen las normas dirigidas a las estabilizaciones, tratamientos y procedimientos que pueden ser asociados a la manipulación del RAP como material de cobertura superficial de dichas vías.

3.2. TRATAMIENTOS GENERALES EN VÍAS RURALES

Las vías rurales generalmente de tercer orden, caminos y demás corredores viales rurales son explanaciones que se han venido acomodando con el tiempo para la circulación de personas y vehículos, con el desarrollo social y económico de la región se intervienen para adecuar el suelo a las circunstancias climáticas y de carga, según sean las circunstancias económicas de inversión. En función de las

mencionadas circunstancias, el primer tipo de cobertura que se le da a una vía es el afirmado.

3.2.1. Afirmados

El afirmado es un material granular que se encuentra especificado dentro de la normativa nacional a través de Artículo 311 de las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías de Colombia. En el artículo 310 de las mismas especificaciones establece los procedimientos para el trabajo que debe hacerse sobre materiales existentes; escarificación, conformación y adición del material granular establecido. La filosofía del trabajo es conservar una regularidad superficial en la cual los vehículos puedan transitar de manera cómoda y segura y que permita la circulación, captación y disposición de las aguas de escorrentía superficial.

3.2.2. Tratamientos sobre suelos

En ocasiones, no existen canteras de material granular que permitan brindar una cobertura adecuada a circulación del tránsito y algunas entidades oficiales han optado por procesar los materiales de la zona, sean los suelos naturales o materiales de préstamo para modificarlos e instalarlos a fin de mejorar las condiciones mecánicas de funcionamiento de estos suelos.

Los tratamientos van desde simples mezclas de adición de cloruro de calcio para evitar la pérdida de finos de los afirmados y mitigar la polución bajo el tránsito vehicular (Artículo 312-13), hasta bases estabilizadas con emulsión, bases estabilizadas con cemento, suelos – cemento. (Artículo 340 - 13 /, Artículo 351 – 13 y Artículo 350 – 13). Igualmente existen una importante cantidad pruebas que apoyan los tratamientos de suelos que permiten reducir algunas características plásticas de la subrasante, en especial para la construcción de estructuras de pavimentos (Sección 600 de las normas de ensayo - INVIAS), las cuales se toman como apoyo para los procedimientos empleados en diseño y construcción con el RAP.

3.2.3. Capas de estructura granular de soporte

Las estructuras de soporte, bases, sub bases granulares y demás corresponden a una gama de capas que de acuerdo con los niveles de tránsito de la estructura deben cumplir con criterios específicos de clasificación. Para este caso en el manual de pavimentos de bajos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías, establece dos tipos de tránsitos: (T1) con menos de 150 mil ejes equivalentes de 80 k N y (T2) entre 150 mil y 500 mil ejes equivalentes de 80 kN,

Donde los ejes equivalentes forman parte del factor de carga patrón para el diseño de estructuras de pavimento.

Según esta equivalencia, los vehículos como carros, camionetas, micro buses no inciden estructuralmente por su bajo peso, mientras que vehículos grandes; buses de dos ejes en adelante si tienen este efecto. En las Especificaciones generales de carreteras del Instituto Nacional de Vías, Artículo 100, nos establece los niveles de tránsito en función de la calidad de los materiales, de los tres niveles de tránsito NT1, NT2 y NT3. El tipo de vías de que tratamos en este informe se encuentra básicamente dentro del nivel 1 (NT1). Bajo esta tipología en las Especificaciones Generales de Construcción de Invías, se encuentra la siguiente gama de alternativas:

1. TSD: Tratamiento Superficial Doble. Artículo 431.
2. BG: Base granular. Artículo 330.
3. SBG: Subbase Granular. Artículo 320.
4. BEC: Suelo estabilizado con Cemento Portland. Artículo 341
5. MDF-2: Mezcla Densa en Frío Tipo 2. Artículo 440
6. BEE-3: Suelo estabilizado con emulsión. Artículo 340
7. MDC-2: Mezcla Densa en Caliente Tipo 2. Artículo 450
8. AFR: Afirmado. Artículo 311
9. CSR: Capa Subrasante. Artículo 220

3.3. TIPOLOGIAS DE TRATAMIENTOS ASIMILABLES CON RAP

De conformidad con los factores de la región se emplea la tipología de tratamiento requerido por los factores preponderantes y de ellos se han tomado como referencia para ser el RAP numerales 2, 4 y 6 con unas variantes propias que deben ser aplicadas al reciclaje. La tipología de combinaciones establecida en el Manual de Bajos Volúmenes de Tránsito del Invías está discreteado de la siguiente forma:

Tabla 1. Combinaciones de capas vías tipo T1 – T2

SIN AFIRMADO				CON FIRMADO			
ALTERNATIVA	COMBINACIÓN			ALTERNATIVA	COMBINACIÓN		
	A	B			A	B	
1	TSD	BG	SBG	1a	TSD	BG	SBG AFR
2	TSD	BG	BEG	2a	TSD	BG	BEG AFR
3	MDF-2	BG	SBG	3a	MDF-2	BG	SBG AFR
4	MDF-2	BEE-3	SBG	4a	MDF-2	BEE-3	AFR AFR
5	MDC-2	BG	SBG	5a	MDC-2	BG	SBG AFR
6	MDC-2	BG	BEC	6a	MDC-2	BG	BEC AFR

Fuente: INVIAS

Se trata de tratamientos sobre vías de baja especificación con o sin afirmado existente, la capa ligada no puede ser inferior a 0,05 m y las bases no menores a 0,15 m. Cabe recalcar que se trata de materiales convencionales los cuales se toman de referencia, especialmente para los temas de caracterización de materiales, respecto de la geometría propia que deben cumplir en su gradación.

3.3.1. Evaluación de calidad

Los parámetros de calidad tenidos en cuenta en esta investigación están asociados a lo requerido para los materiales para pavimentos de INVIAS, adicionalmente parámetros A.A.S.H.T.O, A.S.T.M, NLT y las normas nacionales del ICONTEC, con ellas se han fijado rangos y tolerancias de comportamiento en los que se describe:

- Resistencia mecánica y química mínima y particular de los materiales granulares que de manera individual y en combinación se empleen en la elaboración de las capas del pavimento.
- Clasificación desde el punto de vista de tamaños y geometría de las partículas con las cuales se dan los rangos de granulometría y continuidad que generan un adecuado acomodamiento de los agregados dentro de la masa de la capa en cuestión y generan las mejores cualidades en cuanto resistencia e impermeabilidad.
- Porcentajes mínimos de algunos minerales, especialmente finos, que producen dentro del conjunto de partículas factores adversos a la resistencia del conjunto y cambios volumétricos que provocan daños e inestabilidad en la estructura de la capa final de la capa construida.
- Se esperan obtener unas características químicas específicas en las cuales se da una afinidad eléctrica entre los materiales granulométricos y los materiales ligantes como el cemento asfáltico, cemento hidráulico y el agua.

- Una determinada calidad y características específicas de los materiales ligantes que finalmente formarán parte de la matriz del conjunto o que permitirán la lubricación interna, la manejabilidad y la obtención de parámetros de resistencia final de las mezclas elaboradas con ellos.
- Que el suelo de fundación cuente con unos valores mínimos de resistencia y humedad con los cuales se conserve el equilibrio geotécnico externo a la estructura del pavimento a fin de garantizar la estabilidad de la misma en el tiempo.

3.4. RECICLAJE DE PAVIMENTO EXISTENTE

Tanto las Especificaciones Generales de Construcción de Invías como del IDU, establecen normas y procedimientos para el tratamiento de reciclaje de pavimento existente.

Figura 8. Ciclo de producción de un reciclaje de pavimento existente



Proceso de reciclaje en frío, en el sitio, mantenimiento de la Carretera Aguas Claras - el Secreto, Regional Casanare - INVIAS. 2012

En el ciclo de producción para el aprovechamiento del desperdicio de la demolición de la Figura 8, se realizó una demolición total del pavimento y se involucró parte de la estructura granular y de conformidad con lo especificado (Artículo 451-07 – Invías), se siguieron los siguientes pasos:

1. Proceso de patología del pavimento existente luego de los respectivos análisis de determinación de índice de deterioro arroja un valor determinado por la Guía Metodológica para el Diseño de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras, es cual establece los parámetros de intervención. Para este caso el índice medido supero en valor $I_s = 6$ y con lo cual la calificación dio pie para la demolición del pavimento.
2. Superado el proceso de estudios y diseños se inician las actividades de obra, en este caso la demolición de la estructura hasta una profundidad de 0,25 m. donde se involucró una fracción de base granular existente.
3. Se toman muestras a fin de confirmar los resultados iniciales de apiques en la fase de estudios y diseño y se hacen los ajustes respectivos a la fórmula de trabajo.
4. Se hacen las adiciones de granulares y emulsión asfáltica en las proporciones previstas, se mezcla con un número determinado de pasadas de la motoniveladora esto se ajusta en obra. En caso de que sea con recicladora de caminos con una sola pasada es suficiente.
5. Se adiciona el cemento hidráulico, es este caso fue el resultado de los estudios de laboratorio en cuanto a su necesidad y su concentración. Se pasa nuevamente la maquinaria de mezcla ajustando la hidratación.
6. Luego de la conformación y el ajuste topográfico se compacta la mezcla resultante y se da un determinado tiempo de curado.
7. Se instala la carpeta asfáltica de protección sobre el material estabilizado.

El proceso descrito se realizó en la Carretera Nacional El Secreto – Aguas Claras, Regional Inviás – Casanare, Contrato de obra 595-2012. El siguiente es el registro fotográfico comparativo luego de varios años de la intervención.

Figura 9. Registro fotográfico comparativo



Mantenimiento Carretera Aguas Claras - el Secreto, Regional Casanare - INVIAS. 2012
Construcción de base estabilizada en frío y aspecto del acabado final luego del pavimento

En esta oportunidad se cumplieron los parámetros establecidos por el INVIAS para la reciclaje de pavimento existente en el sitio, para una vía de tráfico NT3, base estabilizada de PAP con emulsión y cemento, que de alguna forma tiene similitud con el proyecto que se desarrolla dentro de la investigación que se realizó a la luz de este trabajo, las diferencias radican en que en esta oportunidad es una vía de nivel de tránsito NT1, se intenta que sea una capa de pavimento de cobertura y no una base estabilizada y los materiales y procesos no se hacen en el sitio sino que sufren un proceso de transporte, almacenamiento y posible contaminación que de alguna forma modifica los parámetros de calidad esperados.

3.5. ASPECTOS BÁSICOS DE ESTABILIZACIÓN DE MATERIALES PARA CARRETERAS Y EL RAP

Los materiales de RAP, en su elaboración, han tenido de cumplir los requerimientos de calidad dados y al ser material de reciclaje de alguna forma se presentan variaciones de comportamiento de los mismos ya que han sufrido un proceso de tratamiento en su construcción un determinado deterioro en el periodo de servicio y algún cambio de características luego de que fueron sometidos al arranque mediante la máquina de fresado o recicladora.

Tabla 2. Características de los materiales para bajos volúmenes de tránsito

ENSAYO		NORMA	PARÁMETRO	TIPO DE MEZCLA									
				A	B		C		D	E		F	
					1	2	1	2		1	2	3	4
Desgaste en la máquina de los Ángeles		E-218 / 219	Máx.	25	25	35	25	35	35	25	35	40	25
Solidez en sulfato de sodio y magnesio		E-220	Máx.	12 -y- 18									
Partículas fracturadas mecánicamente 1/2 c		E-227	Min.	75	75	60	75	60		75	60	50	75
Angularidad método A (Agregado fino)		E-232	Min.				40	35	60	40	35	35	40
Coeficiente de pulimiento acelerado		E-239	Min.	0,45	0,45					0,45		0,45	
Forma: índice de alargamiento y aplanamiento		E-230	Máx.	30			0,45						
Forma: índice de alargamiento y aplanamiento		E-240	Máx.		10		10		10	10		10	
índice de plasticidad IP		E-125/126	Máx.				NP			NP		NP	
Equivalente de arena		E-133	Min.				50			50		30	50
Contenido de impurezas (Agregado grueso)		E-237	Máx.	0,5	0,5		0,5		0,5			0,5	
Adherencia: Striping		E-737	Min.		95				95				
Bandeja		E-740	Min.	80									
Resistencia conservada. Inm.comp.		E-738	Min.						75			50	
Resistencia conservada Tracción indirecta		E-725	Min.							80			80
SIMBOLOGÍA	A Tratamiento doble			1	Carpeta de rodadura					NT-1 Fuente: INVIAS			
	B Mezcla abierta en frío			2	Carpeta intermedia								
	C Mezcla densa en frío			3	En frío								
	D Mezcla abierta en caliente			4	En caliente								
	E Mezcla densa y semidensa en caliente												
	F Reciclado de pavimento existente (Adición)												

En la columna F-3 de la tabla 2 se observan los valores de los resultados óptimos de las mezclas en frío con RAP para bajos volúmenes de tránsito, el desgaste en la Máquina de los Ángeles debe ser mínimo de 40%, un valor atípico dentro de la tabla, siendo el mayor valor, el desgaste químico es similar al resto de los agregados 12/18, Caras fracturadas mínimo 50%, angularidad agregado fino método A, mínimo 35%, coeficiente de pulimiento acelerado 0,45, índice de forma – alargamiento máximo 10%, no debe haber plasticidad en la muestra, 30% de equivalente de arena, 0,5% máximo de impurezas y una resistencia conservada para el ensayo de inmersión compresión del 50%.

Estas condiciones de calidad de las muestras se esperaría que se presentaran si se tienen en cuenta que los agregados para concreto asfáltico deben poseer unas características mecánicas importantes, sin embargo, al estar expuesto el RAP a la intemperie y la falta de cuidado en su tratamiento podría desmejorar algunas de estas características esperadas.

3.5.1. Estabilización del material con cemento hidráulico

El termino de estabilización es aplicado al proceso físico o químico de mejora de las características mecánicas de un material fino o granular, especialmente se aplicó sobre aquellos materiales arcillosos a los que se le quería bajar la plasticidad y/o susceptibilidad de su cambio volumétrico en presencia de cambios de saturación.

Igualmente, para mejorar las características de resistencia de suelos y agregados procesados. La cementación de suelos naturales, por ejemplo, con adiciones de cemento portland o de afirmados le dan a las vías rurales la posibilidad de tener una mayor duración en servicio y de acuerdo con las estadísticas de la PCA (Portland Cement Association) en los Estados Unidos se aplican a más de 120 mil kilómetros de calles, carreteras y aeropistas de bajos volúmenes de tránsito, donde sus espesores de tratamiento a manera de suelo – cemento, son tratadas de los 0,1 a los 0,4 m de espesor en concordancia con la importancia de la vía de comunicación.

Como es de esperarse el comportamiento y la estabilidad de las capas de suelo – cemento están muy relacionadas con la naturaleza del suelo intervenido, los parámetros de la PCA, para valores medidos a 28 días de curado, son los siguientes:

- | | |
|--|---------------------|
| - Resistencia a la compresión, saturada: | 400 – 900 psi |
| - Módulo de rotura: | 80 – 180 psi |
| - Módulo de elasticidad a la flexión | 600,000 – 2'000.000 |
| psi. | |
| - Relación de Poisson: | 0,12 – |
| 0,14 | |

3.5.2. Proceso de diseño PCA (Boletín 142)

De acuerdo con la clasificación de los suelos de la AASTHO, los suelos a tratar pueden ser de las siguientes características:

1. Suelos granulares – Grupos A-1, A-3, A-2-4, y A-2-5
2. Suelos de gradación fina – Grupos A-2-6, A-2-7, A-4, A-5, A-6, y A-7.

Este factor asociado con deflexiones, radios de curvatura y resultados de fatiga son empleados para generar diseños óptimos de suelo cementos, los aspectos a evaluar son:

- Resistencia del suelo.
- Periodo de diseño del pavimento.
- Tráfico.
- Espesores de base de capa de suelo-cemento.
- Espesor de la capa de cobertura superficial.

El procedimiento busca espesores de capa de suelos naturales o afirmados, los valores medios de acuerdo con la PCA son:

Tabla 3. Valores medios de soporte del suelo PCA

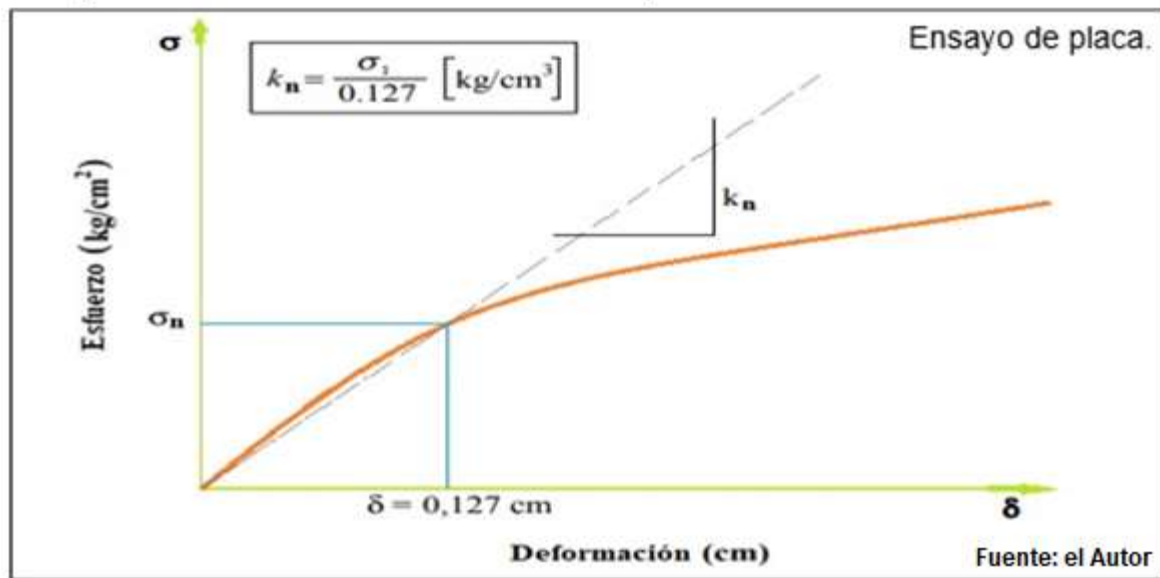
TIPO DE SUELO	RESISTENCIA	CBR (%)	VALOR DE K (Lb/pul ³)
Finos donde predominan limos y arcillas	Baja	3 a 6	100 a 150
Arenas pobremente gradadas, predominantemente arenosos, bajos en limos y arcillas	Media	6 a 10	150 a 200
Gruesos, matriz bien gradada, NP.	Alta	> de 10	> A 200

Fuente: PCA – Boletín 142

El valor de K es el factor de medición que se establece a partir del ensayo de placa y hace referencia a la tensión transmitida por la carga de una placa rígida sobre el suelo el cual es penetrado o deformado por un asentamiento y la placa tiene un diámetro de 30,5 cm.

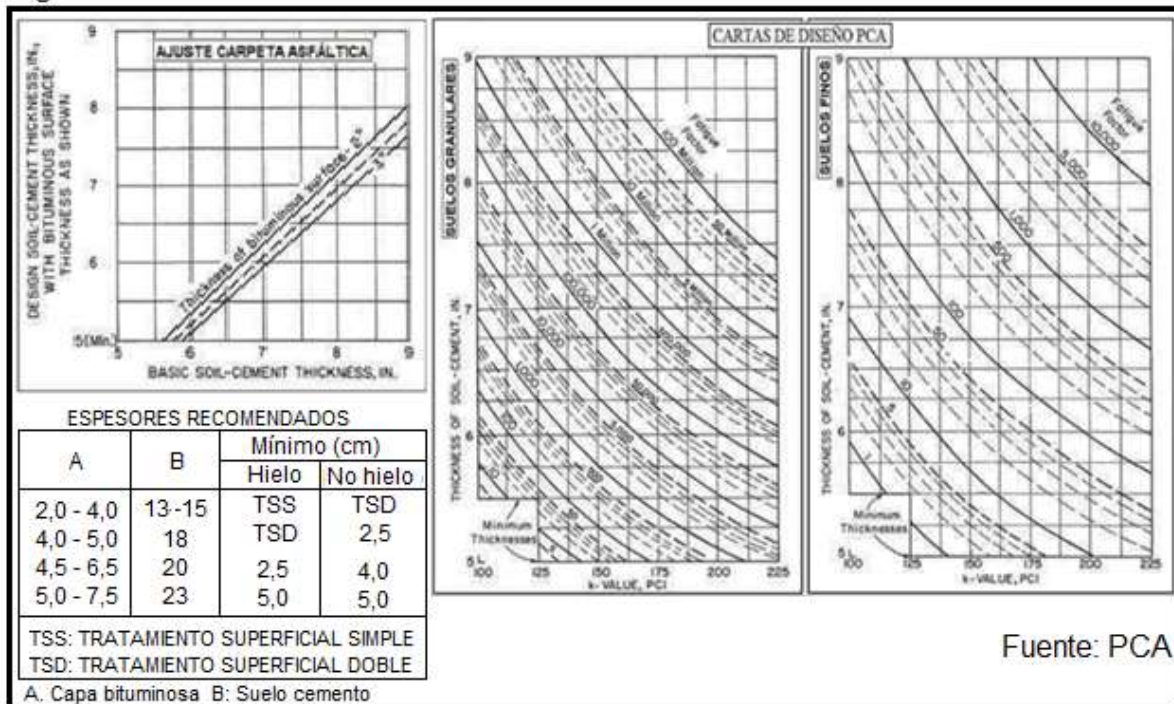
Entonces: el módulo k es la reacción entre la tensión capaz de generar una penetración de placa de 0,05 pulgadas (0,127cm), siendo la pendiente de la recta que une la curva de tensión - deformación con el origen

Figura 10. Curva esfuerzo – deformación y módulo de reacción del suelo.



El periodo de diseño de los materiales tratados con cemento hidráulico es mínimo de 20 años para valores de tránsito de T1 o T2 correspondientes a bajos volúmenes. La PCA tiene márgenes de espesor asociados al valor de K del suelo y al número de ejes equivalentes en el periodo de diseño, se tiene la posibilidad de instalar capa de rodadura sobre el tratamiento para lo cual se efectúan determinados ajustes.

Figura 11. Cartas de diseño de la PCA



Con esta metodología y los valores establecidos se puede tener un valor tentativo de los espesores con los cuales se hacen las estimaciones de diseño y junto con los respectivos ensayos se establecen los valores reales con los cuales se diseña - el suelo cemento.

3.5.3. Estabilización del material con cemento asfáltico

El tratamiento de suelos granulares con materiales bituminosos se realiza en procesos de mezcla en frío con emulsiones asfálticas o asfaltos espumados buscando que los agregados y el cemento asfáltico se combinen para provocar procesos de cohesión con los cuales la resistencia final de la mezcla es mayor la adhesión incrementa la resistencia a los esfuerzos cortantes a la flexión y al módulo elástico. Los factores para tener en cuenta en este tipo de mezcla son:

1. Tipo de proceso, sea con emulsión o asfalto espumado.
2. Tipo de suelo.
3. Condiciones de manejo de la mezcla.
4. Ensayos por emplear.

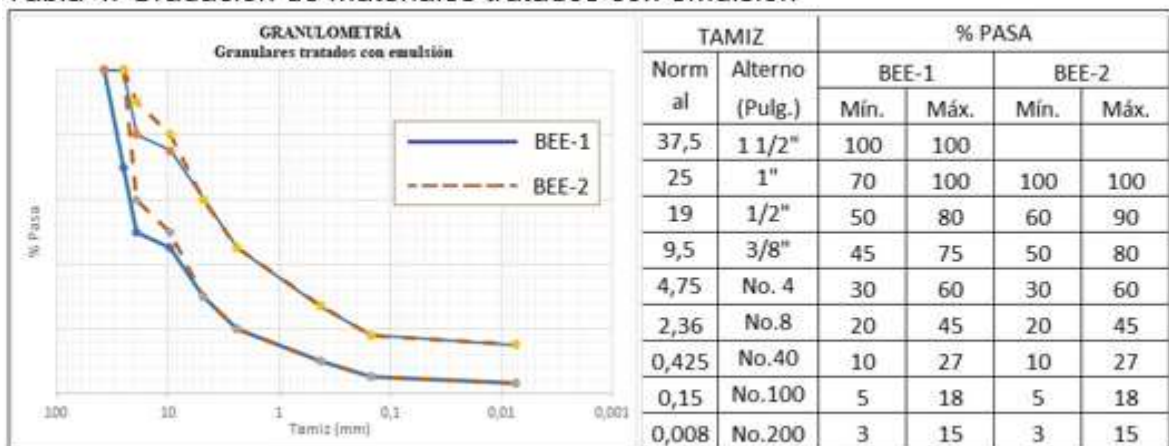
Los suelos finos, al igual que otros tipos de mezcla, requieren una mayor cantidad de bitumen dadas sus características de finura, de acuerdo con las EGC, artículo 340, es necesario que se tengan las siguientes condiciones:

- Gradación: Pasa No. 40 debe ser el 100% y pasa 200 entre 5 y 25%.
- Índice de plasticidad mínimo: 7%
- Suelos tipo A – 1 – b o A – 2 – 4
- CBR mínimo del suelo: 15%

Como se observa, no todos los suelos son susceptibles de ser estabilizados a través de tratamientos de suelo – asfalto. Como se observa en la tabla 2, para el RAP es necesario que se cumplan ciertas características adicionales en cuanto a su geometría, resistencia y comportamiento químico.

Cuando se trata de estabilización de materiales granulares con productos bituminosos existen unas tolerancias establecidas en la norma de bases estabilizadas con emulsión tipo BEE-1 y BEE-2. Las franjas granulométricas son las siguientes:

Tabla 4. Gradación de materiales tratados con emulsión



Fuente: el Autor

Respecto de las demás pruebas de calidad de los materiales, se espera que el IP sea mínimo de 7%, el desgaste en la Máquina de los Ángeles sea mínimo del 50% y el pasa 200 multiplicado por el índice de plasticidad sea menor a 72. La emulsión para el tratamiento tendrá que poseer las siguientes características de calidad:

Tabla 5. Requisitos de calidad emulsión para mezclas con agregados

ENSAYO	NORMA INVIAS	CRL-1		CRL-2	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybol Furol 26°C (s)	E-763		200		100
Contenido de agua en volumen (%)	E-761		43		43
Estabilización almacenamiento (Sed. 7 días) (%)	E-764		5		
Destilación, Cíntenido de asfalto residual (%)	E-762	57		57	
Tamizado, retenido T20 (850 mm)	E-765		0.1		0.1
Carga de partícula	E-767	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
PH	E-768		6		6
Penetración residuo destiación (25°C, 100 g, 5s) 0,1 mm	E-706	60/100	100/250	60	100
Ductilidad residuo destilación (25°C, 5s) cm	E-769	40		40	
Solubilidad residuo en tricloroetileno (%)	E-713	97		97	

Fuente: INVIAS

Los diseños granular – emulsión se realizan a través del ensayo de inmersión compresión (INV E-812, materiales finos y INV E- 738 materiales gruesos), se busca establecer la mejor condición de durabilidad de la mezcla y su comportamiento mecánico luego de procesos de inmersión en agua, comparado con el inicial luego de la determinación de una cantidad óptima de ligante.

3.6. PARÁMETROS EMPLEADOS EN EL DISEÑO CON RAP

La especificación técnica usada para las mezclas con RAP se titula “Reciclaje de pavimentos asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica” Sección 450 – 11. Se describe la manera como se debe hacer el reciclaje de un pavimento existente en el sitio con el uso de emulsión asfáltica o asfalto espumado y, si es el caso, la incorporación de elementos adicionales a fin de conseguir una adecuada mezcla.

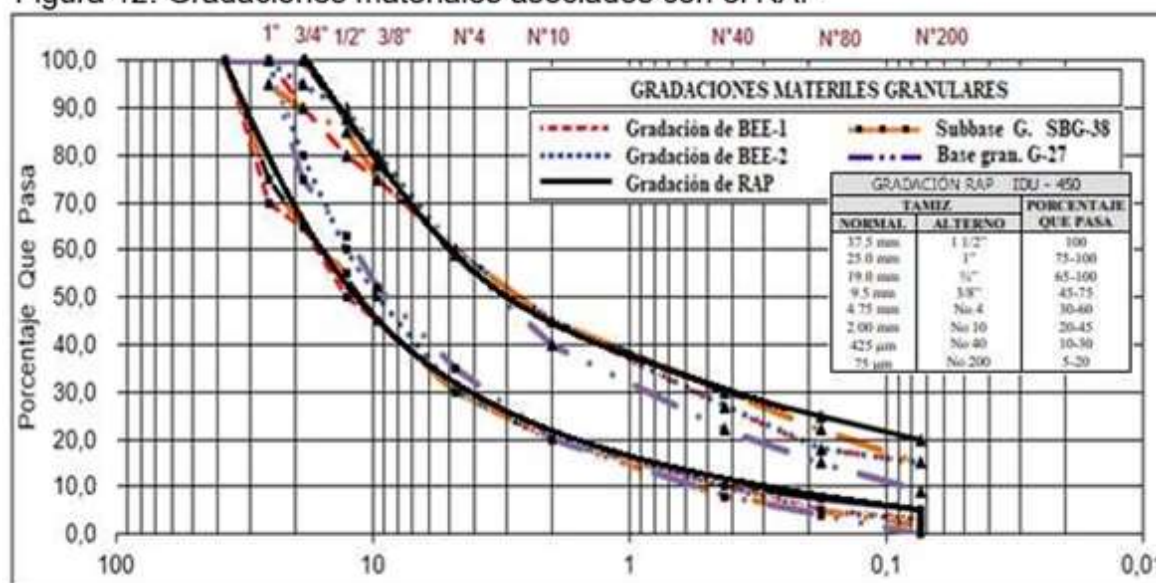
3.6.1. Calidad de los materiales de rap

En función de las normas mencionadas, la calidad de los materiales granulares para RAP, especialmente para el tratamiento que se debe tener en mezclas en frío son las siguientes:

- Granulometría

En la siguiente gráfica se observan las gradaciones de los materiales granulares que de alguna forma tienen relación del manejo del RAP.

Figura 12. Gradaciones materiales asociados con el RAP



Fuente: EL AUTOR

Se observa similitud entre la sub base granular SBG-38 y la distribución esperada para el RAP, sin embargo, las gradaciones para las bases estabilizadas guardan también alguna relación y la base granular, que puede ser empleada para encajar, se encuentra ligeramente sesgada en los finos a la izquierda y en los gruesos a la derecha. Tanto sub base granular como la misma base están habilitadas por la

norma del RAP para ser utilizadas. Desde el punto de vista del diseño para bajos volúmenes de tránsito, la gradación de las bases estabilizadas se encuentra dentro de las tolerancias requeridas para la distribución de tamaños del RAP.

- Agregados

En cuanto a características de los agregados granulares se deben cumplir los requerimientos que hacen parte de las normas INVIAS, de las tablas que conforman la norma, se han extractado las siguientes:

Tabla 7. Requisitos de calidad de agregados.

TIPO DE TRATAMIENTO O MEZCLA	DESGASTE LOS ÁNGELES	PÉRDIDAS EN ENSAYO DE SOLIDEZ		PARTÍCULAS FRACTURADAS MECÁNICAMENTE. (Agregado grueso) % mínimo 1 cara/2 caras	ANGULARIDAD Método A (Agregado fino)	COEFICIENTE DE PULIMENTO ACCELERAD.	Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	I. P.	EQUIVALENT. DE ARENA	CONTENIDO DE IMPUREZAS (Agregado grueso)	ADHESIVIDAD		
		Sulfato de sodio	Sulfato de magnesio								Riedel Webber	Resistencia conservada Imm-Comp.	Resistencia conservada Tracción indirecta
NORMA INV	E-218 E-219	E-220	E-220	E-227	E-239	E-232	E-240	E-125 E-126	E-133	E-237	E-774	E-738	E-725
LECHADA ASFÁLTICA	25 % máx.	12% máx.	18% máx.		45 % mín.			N.P.	50 % mín.		4 min		
MEZCLA Densa EN FRÍO - Agregado grueso	25 % máx. (rodadura) 35 % máx. (intermedia)	12% máx.	18% máx.	75/- (rodadura) 60/- (intermedia)		0.45 min (rodadura)	10 % máx.			0.5 % máx.			
- Agregado fino		12% máx.	18% máx.		40 % mín. (rodadura) 35 % mín. (intermedia)								
- Gradación combinada								N.P.	50 % mín.			75 % mín.	
RECICLADO DEL PAVIMENTO EXISTENTE (Material de adición)	40 % máx. (en frío) 25 % máx. (en caliente)	12% máx.	18% máx.	50/- (mezcla) (en frío) 75/- (mezcla) (en caliente)	35 % mín. (en frío) 40% mín. (en caliente)		10 % máx. 10 % máx.	N.P.	30 % mín. (en frío) 50 % mín. (en caliente)			50 % mín. (en frío) 80 % mín. (en caliente)	

Fuente: INVIAS - fragmento tabla 400.1 (a)

De acuerdo con la especificación INVIAS, se extractó del Artículo 400 – 07 de lo anterior se resume en la tabla lo correspondiente al requerimiento de calidad de los agregados granulares para mezclas en frío, para micro pavimentos y para de RAP, de tránsito NT1.

- Desgaste en la máquina de los ángeles (E 218/219). Máximo 40%
- Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de sodio (E-220) Máximo 12%
- Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de Mg (E-220) Máximo 18%
- Partículas fracturadas mecán. Agreg. Grueso. (E-227) Mínimo 50%
- Angularidad - Método A, Agregado fino. (E-239). Mínimo 35%
- Partículas planas y alargadas 5:1 (E-240). Máximo 10%
- Índice de plasticidad (E-125 / 126) NP
- Equivalente de arena (E-133). Mínimo 30%
- Resistencia conservada – inmersión compresión (E-738). Mínimo 50%

Respecto de la tabla 2 de los parámetros de calidad para bajos volúmenes de tránsito, donde se establecen las propiedades de los agregados de adición de RAP existente, se deben presentar las siguientes propiedades:

Desgaste en la máquina de los ángeles (E 218/219). Máximo 40%

- Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de sodio (E-220) Máximo 12%
- Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de Mg (E-220) Máximo 18%

• Partículas fracturadas mecan. Agreg. Grueso. (E-227)	Mínimo 50%
• Angularidad - Método A, Agregado fino. (E-239).	Mínimo 35%
• Forma - Partículas planas y alargadas 5:1 (E-240).	Máximo 10%
• Índice de plasticidad (E-125 / 126)	NP
• Equivalente de arena (E-133).	Mínimo 30%
• Resistencia conservada – inmersión compresión (E-738).	Mínimo 50%
• Coeficiente de pulimiento acelerado (E-239).	Máximo 0,45%
• Contenido de impurezas – agregado grueso. (E-237).	Máximo 0,5%

- Emulsión asfáltica

Así como se tiene en cuenta la normativa INVIAS (Artículo 461-07), dentro de la especificación (Sección IDU 450-11), los materiales bituminosos, en este caso la emulsión, establece que debe ser tipo CRL-1, con residuo de destilación con penetración 100-250.

- Llenante activa

La norma establece el uso de una serie de elementos de reacción físico -química, dentro de los cuales está el cemento portland, la cal hidratada y las cenizas volantes. En nuestro caso se empleó el primero de ellos.

No se establece la tipología del cemento hidráulico de adición, sin embargo, ya en obra, la experiencia ha generado resultados diferentes con el uso de cementos comerciales, tipo 1, de diferente procedencia, ese tema es de investigación particular ya que los procesos de producción y adiciones del mismo son diferentes para cada empresa comercial razón por la cual requiere un estudio especial.

- Aditivos

Se establecen otros materiales encargados de mejorar la adherencia entre los agregados y el asfalto, dependen de los diseños y deberán garantizar el cumplimiento de la resistencia conservada y que no se afecten otras propiedades en la mezcla.

Agua

Al igual que otros tipos de mezcla y con forme a la norma, debe estar libre de materia orgánica y elementos que alteren los resultados de la mezcla, es decir que reacciones con sus componentes de manera negativa.

3.6.2. Diseño de mezcla y fórmula de trabajo

Se Las siguientes son las condiciones de obtención de la fórmula de trabajo y los trabajos de campo de acuerdo con lo estipulado en la normativa disponible.

- Sección 450 – 11 IDU

El constructor define una fórmula de trabajo cumpliendo lo especificado, presentando informe a la interventoría, sin importar su aprobación el constructor es responsable de dicho diseño. Esta fórmula será modificada solo si es autorizado por el interventor.

El reporte de diseño junto con sus modificaciones deberá tener la totalidad de las caracterizaciones de materiales y las respectivas pruebas de resistencia de los ensayos de compresión inconfiada o tracción indirecta según sea el caso.

Los mecanismos de diseño deben ser el producto de una especificación particular en cuanto hace referencia a la resistencia pudiendo ser por resistencia a la compresión inconfiada, tracción indirecta o módulo dinámico. Si no se da este caso se empleará el ensayo de inmersión – compresión, dentro del cual se fija una resistencia de briquetas curadas en seco mayor o igual a 2000 Kpas, para una resistencia conservada superior o igual al 75%. No obstante, a lo anterior en la tabla 7 de los requisitos de los materiales para el tránsito NT1 este remanente de resistencia baja al 50%.

Se incluyen resultados complementarios que se asocian a el nivel de importancia de la vía, su tamaño y plazo de ejecución y para el tránsito T0 y T1, se requieren ensayos de resistencia a la tracción indirecta curado en seco y en húmedo, mínimo de tres (3) briquetas. Cabe recalcar que en la tabla 7 se establece que esos ensayos solo se realizan sobre mezclas en caliente. Para tránsitos mayores se pide módulo dinámico con su respectiva curva de fatiga.

En cuanto al equipo se tiene en cuenta:

- Un equipo de trituración y tratamiento de agregados de adición

Un equipo de trasporte de agregados de adición

- Equipo de desegregación del material del pavimento existente y mezcla
“Recicladora”
- Si es posible, la recicladora debe tener aditamentos para incorporar la emulsión o el asfalto espumado, según sea el caso, con los dispositivos de graduado de caudal.

- Equipo para extensión, nivelación y compactación

Posterior a ello viene el proceso de construcción, la disgregación, conformación, adiciones de materiales necesarios para cumplir con los parámetros de diseño y las respectivas normas.

- Artículo 461-07 - Invías

En este artículo se definen, como en el anterior, las especificaciones que se deben tener en cuenta para la calidad de los materiales, el equipo de construcción donde la recicladora forma parte importante del proceso, la inspección de la superficie a reciclar y la recolección de las muestras de material forman parte de la fase preliminar y se establecen dos (2) perforaciones por kilómetro y se tiene previsto que la máquina recicladora este en el sitio para tomar las respectivas muestras a caracterizar, se debe tener en cuenta que esta actividad es previa a los estudios de laboratorio y lógicamente a la construcción.

En el muestreo y caracterización de los materiales de la superficie a reciclar se deben seleccionar tramos representativos que deben ser verificados por el interventor. Las normas de la calidad de los materiales son similares ya que se originaron en esta entidad y es el IDU quien la toma de referencia.

El diseño de la mezcla debe tener en cuenta las cantidades apropiadas de los componentes y la adición de agregados pétreos, si es necesario. Para la norma es importante el manejo de las humedades de trabajo en el proceso de la mezcla y en la compactación, ensayo modificado de compactación INV E-142, de tal forma que se recomienda la humedad óptima de compactación resultante del ensayo restándole el 0,5% y la que se provoca se el proceso de curado de emulsión o cemento espumado.

El valor de la resistencia de la mezcla con el uso de emulsión es aquel que resulta del ensayo de inmersión compresión, donde la resistencia conservada de probetas curadas en seco es mínima de 20 kg/cm² y la resistencia conservada curada en húmedo mínimo 75%. Para el caso de asfalto espumado se tienen otros valores.

Al igual que en la norma IDU, los procedimientos y métodos de diseño, así como los criterios de evaluación de las mezclas deberán estar plasmadas en una especificación particular, este proceso deberá ser aprobado por la interventoría del contrato.

Se debe tener en cuenta una fase inicial de experimentación, tramo de prueba, donde se hacen los ajustes necesarios para que la fórmula de trabajo sea la

apropiada por tramo homogéneo y solo se podrá iniciar el proceso de estabilización si se cumplen los criterios establecidos por el diseño.

Se dan las respectivas recomendaciones para la preparación de la superficie a reciclar; bacheos, reparaciones de fallas profundas de tal forma que se prevengan deficiencias en el soporte, estudio de incorporación de agregados, aditivos y demás materiales de complemento. Se dan indicaciones de juntas de trabajo, de tiempo de curado, que establece una velocidad de circulación de 30 kph en las primeras 48 horas y en caso de asfalto espumado no se da al tráfico en 3 días, el periodo de curado de la estabilización del reciclaje es de 10 días para emulsión y 5 días para espumado, en este periodo se colocaran riegos de protección antes de la instalación de la siguiente capa.

Un factor importante es la limitación de temperatura para la aplicación del proceso en frío es que no se debe ejecutar en ambientes de trabajo, a la sombra, menores de 5°C de temperatura medio ambiental y que no exista lluvia en su instalación. Los demás parámetros guardan similitud entre las normas descritas.

3.7. CONCLUSIÓN DEL ANALISIS DE LA NORMA

En el numeral 3.4. de este documento se trajo a colación la aplicación concreta de las normas anteriormente analizadas y respecto de su aplicación directa a la investigación que se ha desarrollado en el presente trabajo se pueden establecer las siguientes consideraciones:

3.7.1. Magnitud y tipología de la maquinaria establecida en la norma

La normativa está dirigida a una escala de mayor inversión a la que se establece para vías terciarias rurales en los que disponer de la maquinaria necesaria para el proceso descrito en las normas resulta ser oneroso, se habla de una máquina de reciclaje, de un sistema de control de manejo de caudales de las adiciones que se deben involucrar en las mezclas. Este tipo de maquinaria podría ser utilizado por concesiones y adicionalmente por el peso de estas máquinas y su volumen, no es posible que puedan circular en las vías rurales que presentan restricción en el tránsito de cierto tipo de cargas.

La maquinaria y equipo empleada en las vías rurales de los corregimientos de las Localidades de Sumapaz y Usme, con forme a los requerimientos, presupuestales y limitaciones geométricas de estas vías son; Motoniveladora, retroexcavadora cargador, compactadores, volquetas y en general, equipo mediano, cabe recalcar que se trata de vías con anchos que, en algunas ocasiones son menores a los

cinco (5) metros de corona y que son zonas de protección ambiental en las que no se permiten cambios en la geometría existente.

3.7.2. Tipo de intervención establecida en la norma

La norma se destina a procesos de reciclado en sitio donde se hace un análisis previo de las condiciones de la carpeta o de la estructura del pavimento que se quiere reciclar, se ha de tener una sectorización inicial y unos ensayos y diseños previos al inicio del tratamiento del pavimento en el sitio. Para la norma, resulta fundamental el examen del estado de la estructura a fin de corregir cualquier tipo de anomalía en la estructura granular antes de proceder a los trabajos de reciclado.

En las vías a las que se refiere el proceso de aplicación del RAP como núcleo de construcción de los pavimentos de las veredas intervenidas, se tiene un material remanente, se efectuaron apiques, ensayos de caracterización y CBR para conocer la característica estructural de estas vías. En las estructuras de pavimento a reciclar se realiza un proceso previo de auscultación a fin de determinar las características deflectométricas de la estructura, inventario de fallas, apiques y caracterización de los materiales de la estructura, todo ello con el ánimo de rehabilitar un pavimento existente, cuestión que no es procedente en estas vías rurales.

3.7.3. La calidad de los materiales

La norma hace énfasis en la calidad de los materiales granulares de adición más que en las características de las partículas provenientes del reciclaje, está concebida para estabilización en frío por lo que el valor de la resistencia de probetas curadas en seco debe ser mínimo de 2000 kpas (20,4 Kg/cm) con una resistencia conservada luego del proceso de inmersión de curado de 75%, aunque en la tabla resumen de los valores de los ensayos de laboratorio realmente es de mínimo el 50% de la resistencia de referencia.

Indudablemente los tratamientos que se le darán al proceso de construcción no hacen referencia a procesos de reciclado en sitio como se establece en el mismo título y texto de la norma, sino que se trata de uso de desechos de demolición de pavimentos provenientes de lugares diferentes a su aplicación. Este factor resulta ser fundamental en los procesos de diseño y construcción de las mezclas utilizadas en la presente investigación ya que los agregados, en su mayoría, no provienen de una maquina recicladora sino de fresadoras de asfalto de los pavimentos del distrito de Bogotá, recolectados por el IDU o por la UMV. Por lo anterior se debe tener un especial tratamiento de los materiales provenientes de la

disgregación de los concretos asfálticos, del proceso de apilamiento que han tenido del mismo transporte, cuestión que no está descrita en ninguna de las normas.

3.7.4. Pertinencia de la norma

El elemento de mayor incidencia dentro del proceso de investigación aplicada que se desarrolló y se evalúa dentro del presente trabajo es que esta norma está dirigida al diseño y construcción de bases estabilizadas producto del reciclaje de pavimentos en el sitio y lo que se hizo y evaluó y se hace seguimiento en este estudio es una mezcla que hace las veces de pavimento con base en RAP que fue dado al tránsito, inicialmente sin ningún tipo de cobertura de protección y que finalmente en los últimos meses se le cubrió con una lechada asfáltica para mejorar su aspecto y darle una mayor expectativa de vida.

Con los parámetros y factores anteriormente descritos en los siguientes capítulos se desarrolla el proceso que se dio para la intervención de un primer contrato de obra pública, la gestión de cambios desarrollada a partir de una serie de anomalías sobrevinientes con la inadecuada aplicación de la norma y la falencia de experiencia y conocimiento en el tema y posteriormente la evaluación de la gestión de cambios.

Con esta experiencia, en un contrato de obra posterior se aplicaron similares procedimientos y la implantación de unos sencillos procesos de construcción que dieron pie para mejorar la condición que, durante varios años, venían presentando las intervenciones con RAP, en las localidades rurales del Distrito Capital y finalmente conseguir una estructura de pavimento con base en el uso de RAP proveniente de los desechos de demolición de concreto asfáltico de la Ciudad de Bogotá.

4. PROBLEMA PARA EL ESTUDIO DE CASO

El estudio de caso nace de los problemas técnicos que se presentaron en la ejecución del contrato de obra para la rehabilitación de parte de la malla vial de la Localidad de Sumapaz un contrato de obra de la Localidad de Sumapaz, luego de iniciada la estabilización de RAP se presentaron toda una serie de fallas prematuras que involucraron una patología generalizada de las mezclas en los diferentes frentes de obra y a partir de esta circunstancia se dio inicio a la fase inicial del presente proceso de investigación aplicada.

4.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se desarrollaron actividades de campo y actividades de oficina de la siguiente manera:

1. Revisión de Documentación técnica, estudios y diseños.
2. Inspección visual e inventario de fallas
3. Programa de ensayos y diseños.
4. Formulaciones
5. Gestión de cambios en estudios y diseños
6. Gestión de cambios en procesos constructivos

Dentro de la documentación se presentan las obligaciones de los ejecutores de contrato y se fijan algunos parámetros de carácter general, como, por ejemplo:

- Se responsabiliza al contratista del diseño de la mezcla bajo las especificaciones del IDU – Sección 450-11, Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica. Debe entregar los diseños antes de ser autorizada la ejecución.
- Establece un espesor de 0,18 m de reciclaje suelto y 0,15 m compacto, en dos (2) capas de 0,09 m, compactando los hombros con vibro-compactador tipo benitín.
- Se recomienda un tipo de esquema de trabajo para la revisión de la mezcla en vía de acuerdo con las dosificaciones de emulsión y la verificación de la cuantía utilizada.

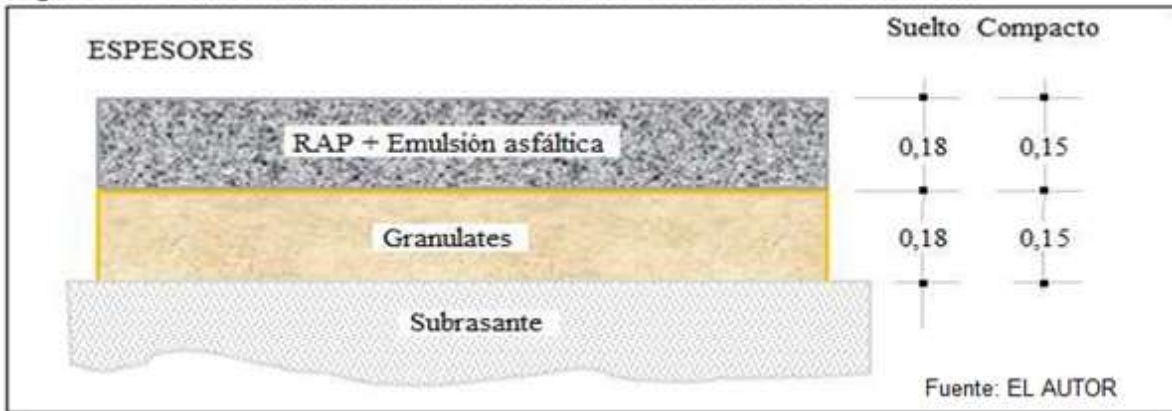
- La interventoría debe estar presente en estos procesos y controlar las cantidades y calidades de la emulsión que se aplica en la estabilización y el control de los viajes de RAP, con vales provenientes de los patios del IDU, posteriormente se aplicarían los reciclajes provenientes, también, de la Unidad de Mantenimiento Vial del Distrito.
- Se requiere adecuar las respectivas obras de arte del proyecto conforme a especificaciones y planos.

Dentro de los productos esperados se tiene:

- Verificación del objeto contractual, específicamente Contrato de obra, apéndices y anexos del mismo.
- Control y verificación del cumplimiento de la geometría prevista
- Controles de procesos de construcción.
- Sugerencias de cambios y modificaciones en los procesos constructivos que puedan mejorar el proyecto.
- Sugerencias que puedan mejorar los procesos de programación.
- Seguimiento de medidas correctivas.
- Orden de reparación y/o reconstrucción de obras defectuosas
- Actas mensuales de recibo de obra.

En términos generales, el proyecto está basado en el mantenimiento integral, rehabilitación y la recuperación de la malla vial local mediante la aplicación o extendido de pavimentos reciclados estabilizados y la construcción de obras complementarias, en los corregimientos de San Juan, Betania y Nazareth, de la localidad de Sumapaz, con una meta física, en pavimento reciclado tipo RAP, de 8000 m, ancho medio de 5,00 m, la estructura recomendable se puede observar en la Figura No. 13.

Figura 13. Estructura con RAP estabilizado con emulsión asfáltica.



Como se observa, se deja abierta la posibilidad de adecuar el trabajo técnico y se limita el proceso a seguir una especificación de carácter general sin adentrarse de alguna forma dentro del proceso de diseño o de construcción. Con las circunstancias planteadas de da inicio al proceso de estudio de caso.

4.2. ANOMALIAS DETECTADAS EN LOS ESTUDIOS

Teniendo en cuenta lo que se resumió en el capítulo anterior, parámetros normalizados y limitaciones propias del proceso contractual y de las mismas normas de referencia no fue posible para el contratista de obra encontrar una fórmula que fuera lo suficientemente consistente para que generara una estabilidad mínima al momento de ejecutar los trabajos de campo. Incluso, él equipo de trabajo en las reuniones de comité de obra aducían que era natural el deterioro prematuro de estas mezclas y que de acuerdo con ello las garantías que pidió la entidad contratante en el proceso contractual no tenía prevista la exigencia de estabilidad de los productos entregados a la comunidad, pues durante varios años se habían acostumbrado a esta circunstancia de daños habituales en contratos anteriores.

Los reportes entregados para la revisión de la documentación de estudios y diseños presentaron una caracterización de materiales de reciclaje de ensayos mínimos que posteriormente al ser comparados con las gradaciones reales no correspondían con la realidad, al parecer en el laboratorio de acomodaron las circunstancias para agregar 70 lts de emulsión por m³ y con ello, siguiendo los lineamientos de los documentos técnicos, ejecutar un tramo de prueba.

La totalidad de los recursos se destinaron para instalar una capa de afirmado y sobre él 0,18 m de reciclaje con adición de emulsión sin tener en cuenta los elementos de drenaje necesarios para conservar las condiciones mínimas de

estabilidad que deben estar garantizadas por las obras de captación, conducción y disposición de aguas de escurrimiento e infiltración.

Los estudios y diseños se constituyeron como un requisito exigible de manera contractual y debía estar involucrado dentro de los informes iniciales de obra y de interventoría, teniendo en cuenta que la función básica del contrato era instalar el RAP a manera de un afirmado con emulsión asfáltica, como era de esperarse en los documentos se cumplía con los parámetros mínimos de calidad para la entrega de este producto sin importar que los materiales reales y los procesos a seguir no guardaran ninguna relación con la realidad del proyecto.

En conclusión, el proyecto carecía de estudios y diseños apropiados para la ejecución de las obras, no existían parámetros de comparación, parámetros de calidad de materiales, procesos de construcción, evaluación de resultados y el contrato no tenía soportes técnicos suficientes para exigir los parámetros mínimos de calidad.

4.3. ANOMALIAS EN OBRA

En campo se verificó la condición de los trabajos en dos partes, lo que corresponde al tramo de prueba y en la ejecución de construcción de las obras.

4.3.1. Ejecución del tramo de prueba

El tramo de prueba fue realizado como un requisito contractual y no como una herramienta de ajuste. La fase de experimentación o el tramo de prueba, de acuerdo con las indicaciones establecidas en los documentos de referencia tanto del IDU como del INVIAS, es aquella en la cual se ajustan los diseños y la fórmula de trabajo, sin embargo, se presentaron una gran cantidad de anomalías que se pueden enumerar así:

1. El tramo de prueba presentó una gran cantidad de fallas, al parecer no se escogió un sitio característico que reflejara la condición general de los diferentes tramos, al momento de la visita se observó la presencia de saturación proveniente de la infiltración del talud aferente.
2. Por las recomendaciones de la entidad contratante en sus documentos técnicos se debería construir un tramo de prueba de 100 m de longitud con el fin de evaluar su comportamiento, efectivamente se cumplió con la longitud del tramo, no se dio espera a los resultados y se inició la

ejecución de los demás sectores con la mezcla utilizada para este tramo de prueba.

4.3.2. Patología de los tramos contruidos

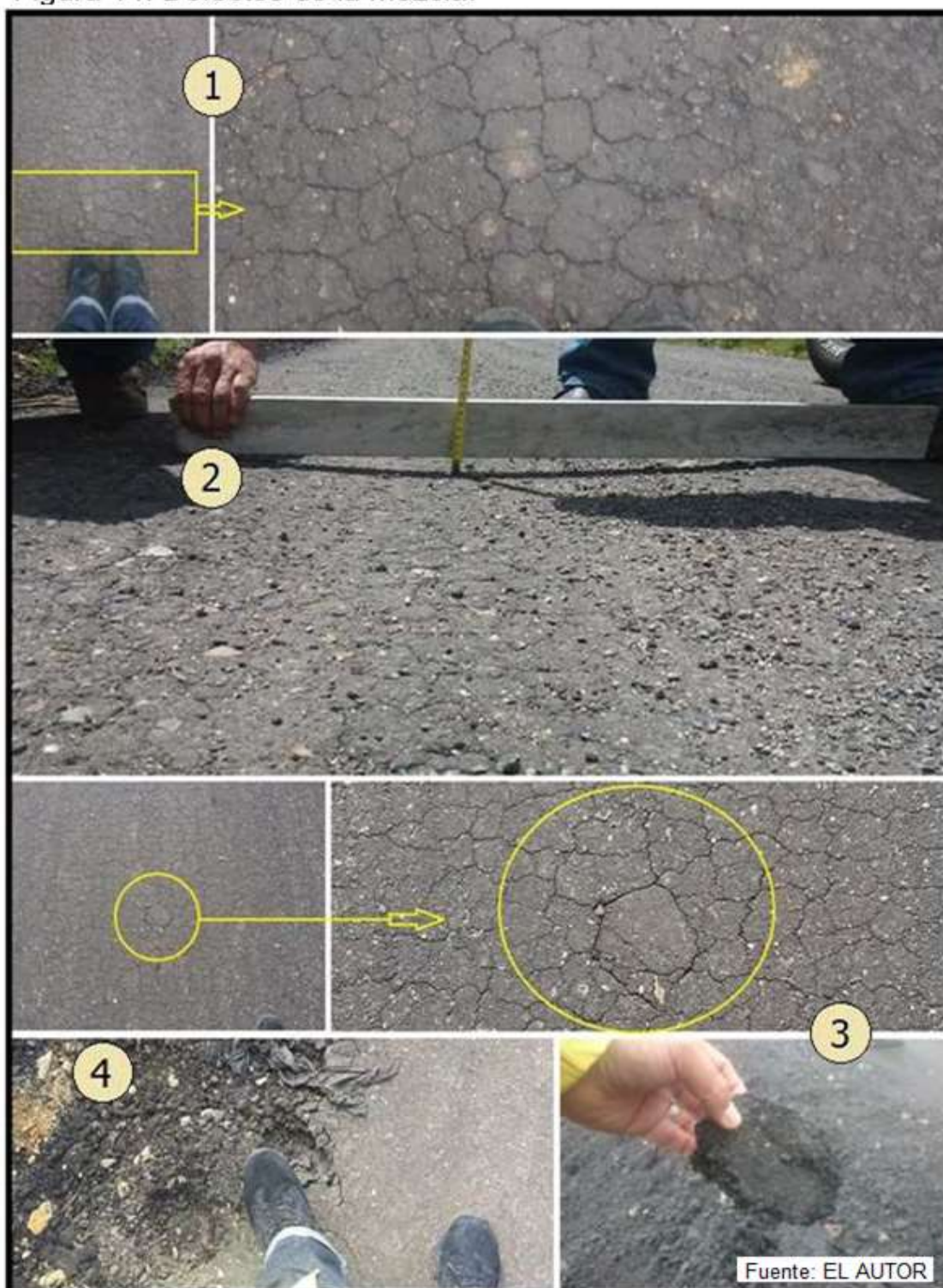
En el registro fotográfico de la siguiente página, figura 14, se resumen buena parte de los defectos que la mezcla presentó en cerca de 2500 metros lineales intervenidos con el contrato (31%), proceso que se había iniciado cerca de 2 meses antes de dar inicio a la presente investigación. En este tiempo se efectuaron los estudios, diseños, el tramo de prueba y se construyeron varios tramos.

Los defectos presentes en las mezclas hacen referencia a la combinación entre la falta de capacidad de soporte de la subrasante y defectos asociados a las mezclas, manejo inadecuado de los materiales y deficiencia en las adiciones de la misma, dentro de estos podemos mencionar:

1. **Fisuración general a manera de piel de cocodrilo:** Si bien es cierto que la mezcla de material de reciclaje tiene una importante proporción de cemento asfáltico envejecido, la filosofía de la adición de emulsión asfáltica es que exista una determinada afinidad eléctrica entre los materiales bituminosos y aprovechar la cohesión remanente que aún presenta el cemento asfáltico y junto con en bitumen nuevo genere una mayor adherencia entre los materiales granulares de la mezcla. Al parecer no existe la suficiente cohesión de la masa y se separa en fragmentos coincidiendo, de alguna forma, con el material particulado del RAP.
2. **Deformaciones permanentes de la mezcla:** En algunos casos involucran los materiales granulares de la base. Este fenómeno está asociado a diferentes circunstancias en el proceso constructivo de la capa:
 - a. Como se pudo constatar en el tramo de prueba fallado, la condición de la base al estar sometida al flujo interno de las aguas de infiltración de los taludes pierde su capacidad de soporte y la sobresaturación reblandece la capa con lo cual las capas superiores colapsan con las cargas superiores.
 - b. La mezcla tiene una deficiencia en su diseño y la falta de capacidad de cohesión genera una baja resistencia y con el paso de las cargas del tránsito cede bajo los neumáticos de los vehículos y se va deformando. Como se aprecia en la fotografía este fenómeno coincide con la parte de la calzada por donde circulan los vehículos.

c. La mezcla estabilizada requiere de un periodo de curado de la emulsión y por tanto de la mezcla, al no dejarse un periodo determinado de tiempo libre del flujo vehicular, la mezcla no tiene la resistencia suficiente para soportar las cargas.

Figura 14. Defectos de la mezcla.



Vías rurales red vial Localidad de Sumapaz. Contrato de mantenimiento 094-2016. Junio de 2017. levantamiento de daños.

3. **Granulometría inadecuada:** Se aprecia la deficiencia en la gradación de los materiales, aparecen partículas heterogéneas que inciden en los valores de resistencia final de la mezcla.

4. **Compactación inadecuada:** Las zonas laterales de la calzada se encuentran completamente sueltas y esta circunstancia se debe especialmente a:

a. Esta zona presenta precipitaciones medias multianuales entre 1000 y 2000 mm al año, se trata de laderas de un sistema montañoso de páramo con pendientes laterales inclinadas con lo cual el agua es un factor que incide de manera definitiva en la estabilidad de las obras viles, al no poseer un sistema de drenaje adecuado el agua erosiona y satura la calzada.

b. La mezcla, en los hombros, requiere de tratamientos especiales o cuidadosos de instalación, conformación y de compactación de los materiales ya que las máquinas que se acostumbra utilizar en estos procesos no desempeñan una labor homogénea.

5. **Deficiencias en la mezcla:** El proceso de la mezcla deja ver sectorizaciones de mayores o menores concentración de emulsión asfáltica y segregación de agregados.

4.3.3. Descripción del aspecto inicial de los caminos a intervenir

En la Figura 15 de la siguiente página se observa la condición inicial de los corredores antes de su intervención, se trata vías rurales con muy poca intervención, eventualmente y discurren sobre laderas limo arcillosas con presencia de bloques y materiales rocosos provenientes de los desprendimientos de las zonas altas.

Algunos de estos caminos han sido intervenidos con material de afirmado y en la mayoría de los casos no presentan drenaje sub superficial, las cunetas se conforman con el proceso de raspado del terreno natural o en el mejor de los casos cuando se emplea material granular para su rehabilitación.

Las obras de drenaje examinadas se encuentran completamente colmatadas, algunas se saben que existen debido a que se alcanza a asomar el cabezote o guardarruedas sobre la vegetación.

Dentro de este panorama, cualquier tipo de intervención que el Estado desarrolle en estas zonas rurales es afortunado para sus habitantes ya que facilitan la movilidad de personas y el tránsito de los productos agrícolas.

Figura 15. Condición inicial de las vías.



4.3.4. Pavimentos de RAP existentes

Existen intervenciones de pavimentos contruidos a partir de RAP, desde hace algunos años y presentan aspectos aleatorios en su condición de calidad, es decir, algunos sectores de pavimentos nuevos se encuentran completamente deteriorados y tramos de pavimentos con años de existencia presentan aspectos adecuados de transitabilidad. Ver figura 16.

Figura 16. Pavimentos de RAP contruidos anteriormente.



Estado de los pavimentos contruidos en 2016. Red vial Sumapaz

Una característica común en los pavimentos contruidos anteriormente, sin importar la edad del mismo, todos ellos dejan ver la piel de cocodrilo generalizada independientemente que ella este acompañada con deformaciones o con otro tipo de patologías. Buena parte de estas estructuras reflejan la necesidad de incorporar filtros, cunetas y obras de drenaje en general.

4.3.5. Procesos constructivos anteriores a la gestión de cambios

El RAP proviene de los patios de almacenamiento del IDU y de la UMV del Distrito Capital, su tratamiento previo es incierto, se deben recoger con las volquetas del contratista en los momentos en que existe el stock en los patios de estas entidades. Estos materiales se suministran a través de las alcaldías locales mediante procesos administrativos de donación y no hay ningún tratamiento anterior a su instalación.

En lo que hace referencia a la superficie de trabajo, se espera que el contratista realice una serie de tratamientos previos, dentro de los cuales está la conformación, la instalación del granular de soporte, entre otros. Como se aprecia en las fotografías mostradas a continuación, existe ligereza en el tratamiento de ellos y es mínima la adecuación del drenaje longitudinal y transversal.

Figura 17. Materiales de soporte del RAP.



La figura 17 deja ver algunas de las anomalías constructivas que inciden de forma definitiva en la calidad de la estructura del pavimento.

1. Costados de la vía sin tratar de manera adecuada, acumulación de material vegetal de corte, humedad y reblandecimiento de los hombros, no existe una pendiente para que las aguas de escurrimiento fluyan hacia las obras de drenaje transversal.
2. Conformación del material granular de soporte sin pendientes longitudinales adecuadas, bombeos insuficientes y compactación irregular y como se observa, al fondo de la primera fotografía, así instalan la mezcla de RAP.

4.3.6. Elaboración de las mezclas

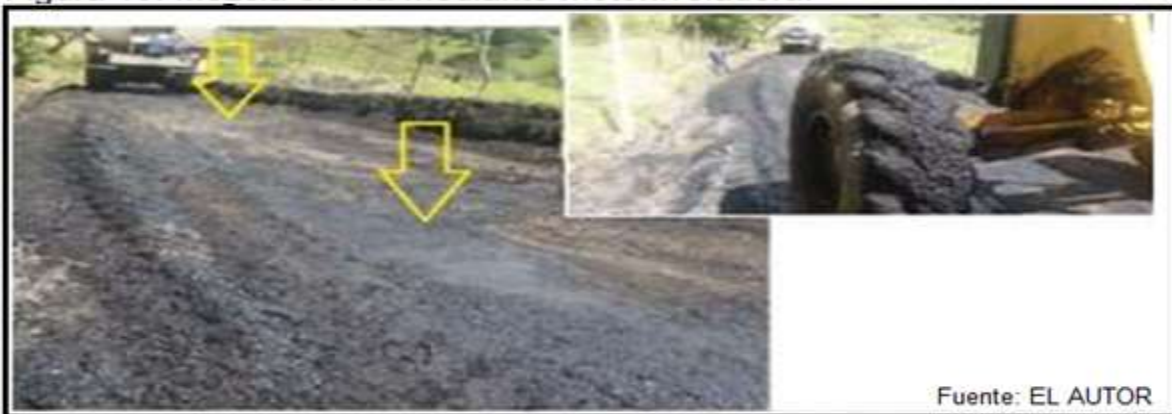
La mezcla hecha en vía tenía previsto la colocación de un porcentaje determinado de emulsión asfáltica (7,2%), que se venía colocando de forma irregular, Figura 18, incluso por la deficiencia en el proceso constructivo alguna fracción de la emulsión terminaba dentro de las alcantarillas.

Figura 18. Colocación del material estabilizante del RAP.



El resultado de este proceso combinado con la operación de la máquina de mezclado, Figura 19, da como resultado heterogeneidad del material combinado, parques de emulsión en algunos sitios y agregados sueltos en otros.

Figura 19. Mezcla en vía mediante motoniveladora.



La fotografía de la figura 20 deja ver el proceso de elaboración de las mezclas con RAP, antes y después de su construcción, de otra parte, son evidentes los sobre tamaños de los agregados.

Figura 20. RAP antes y después de la mezcla.



4.4. ENSAYOS MEZCLAS INSTALADAS

Luego de las inspecciones visuales, se inició un proceso de toma de muestras sobre las mezclas instaladas en diferentes vías de la malla vial de la Localidad de Sumapaz, para ello se utilizó un extractor de núcleos y este es el aspecto que se pudo observar en dicha actividad. Figura 21. Esta tan suelto el material que en algunos puntos no es necesaria la máquina dado que ellos salen manualmente.

Figura 21. Núcleos tomados en vía.



En la toma de las muestras se ha podido constatar la deficiencia de la cohesión de los materiales que refleja la insuficiencia de liga de los agregados de RAP, es tan evidente esta circunstancia que tal como aparece en la fotografía 2 de la figura 22 los núcleos no se pueden extraer compactos, sino que se disgregan con el agua de refrigeración de la broca.

Figura 22. Aspecto de la mezcla en el exterior y en el interior.



Figura 23. Mezcla luego de curada.

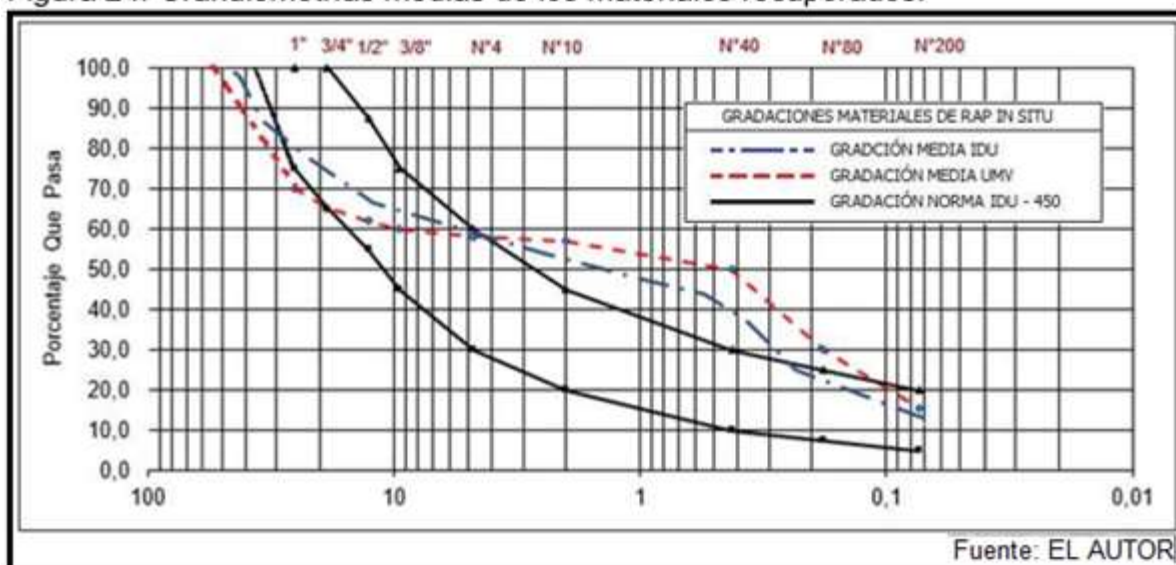


En aquellos lugares donde la fisuración genera tamaños de bloque mayores es posible extraer los núcleos de manera parcial, sin embargo, al fondo de orificio de extracción queda el material completamente suelto.

4.4.1. Resultados de ensayos

Se realizaron ensayo de contenido de asfalto para las fracciones de los núcleos extraídos, así como ensayos de clasificación, los ensayos de resistencia no fue posible realizarlos ya que al no poder conseguir especímenes completos e íntegros no fue posible evaluar esta característica.

Figura 24. Granulometrías medias de los materiales recuperados.



Los resultados de la caracterización granulométrica promedio de los materiales recuperados de las muestras tomadas en campo, Figura 24, deja ver que no se cumple con la geometría de partícula establecida en la norma, igualmente en el ensayo de extracción, la fracción de bitumen fue de 3,5% a 4,3%, lo que indica que la mezcla estaba escasa de bitumen y más si se tiene en cuenta que parte del material cementante corresponde al asfalto envejecido.

4.4.2. Conclusión de esta fase de prospección

En términos generales se presentan deficiencias en estudios y en procesos de construcción que finalmente determinan el deficiente resultado al que se llegó. Las siguientes son las conclusiones referentes a este análisis.

1. La normativa aplicable a estos procesos constructivos presenta limitaciones importantes y no es posible aplicarla de manera normal al tipo de vías intervenidas ni al tipo de maquinaria a utilizar.
2. No existe una asociación directa entre los trabajos de campo y los trabajos de laboratorio, se toma a la ligera el componente de estudios y diseños, así como la fase de prueba inicial y ajuste.
3. No se lleva a cabo el principio básico de ingeniería de pavimentos que establece que el soporte debe ser estable y con un adecuado sistema de manejo del drenaje.
4. La mezcla presenta problemas la de deformaciones, piel de cocodrilo y dificultad para los procesos de compactación en obra.
5. Existe una heterogeneidad en los materiales de RAP, aunque su origen proviene de dos fuentes diferentes; UMV e IDU, su gradación no es

regular y presentan sobre tamaños, así como falta de finos en la franja de las arenas gruesas.

6. No se tenía en cuenta que deben existir periodos de curado, aunque no es posible cerrar la vía teniendo en cuenta que es una red vial escasa de tramos y no existe la posibilidad de inhabilitar tramos por periodos prolongados de tiempo, si se puede regular la velocidad de tránsito.

7. No hay procesos claros de construcción, al parecer los encargados de ejecutar las labores de campo no cuentan con una instrucción de la manera como debe elaborarse la mezcla, conformación y compactación de este tipo de materiales.

Es así como se configura una situación ejemplar para intervenir el proyecto y dar una solución integral a la problemática de estudios y diseños, constituyendo un esquema de trabajo debidamente soportado por estudios de materiales, ensayos de laboratorio, diseños y técnicas de construcción.

La experiencia en otros países deja ver el cuidado y la atención que requiere cada uno de los componentes del ciclo, desde el estudio mismo de los materiales de reciclaje, la obtención de las mezclas y el análisis de los resultados de las pruebas.

La mejora del estado del arte en nuestro medio involucra la aplicación de los principios básicos, ajuste de las técnicas y conceptos que están limitados para los materiales convencionales y que deben tener un tratamiento especial destinado de manera específica al RAP, como material de construcción de carreteras, en primera instancia para vías de bajo volumen de tráfico con lo cual se contribuye a mejorar los factores de desarrollo económico de estas zonas rurales.

5. DESARROLLO DE LA GESTIÓN DE CAMBIOS DEL PROYECTO FASE I

La primera sección del informe fue dedicada a establecer la caracterización general de la zona del proyecto, los parámetros básicos del manejo del RAP, una visión del estado del arte en diferentes partes del mundo, los aspectos relativos a la normativa aplicable al RAP en Colombia, los factores que dieron pie para el estudio de caso del proyecto y los análisis de las condiciones patológicas de las mezclas objeto del desarrollo de la gestión de cambios que se efectuará a continuación.

5.1. LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA GESTIÓN DE CAMBIOS

La siguiente fue la metodología seguida para efectuar el desarrollo de la gestión de cambios e involucrar acciones destinadas a reestablecer la calidad del producto entregado y de manera adicional para configurar una metodología de trabajo más racional aplicable a otros tipos de proyectos de similares características.

5.1.1. Actividades preliminares

El proceso de gestión de cambios se inicia con las actividades preliminares del proyecto, es decir involucrar como parámetro básico el examen topográfico de los corredores viales involucrados, instalación de sistema de drenaje de infiltración, superficial longitudinal y transversal, atención a zonas inestables, mitigación de las mismas o la respectiva discrecionalidad en la intervención de sectores inviables.

5.1.2. Muestreos de materiales de RAP

Se realizó un muestreo sistemático de las pilas de material de los patios de la UMV y del IDU a fin de establecer algún tipo de guía para el desarrollo de los diseños de laboratorio, para este trabajo se recomendó tomas muestras del tercio medio de dichas acumulaciones de material ya que por fenómenos de segregación la parte superior tendrá exceso de finos y la inferior de sobre tamaños y de esta instrucción surge el primer lineamiento operativo que es solicitar el llenado de las volquetas con materiales del centro de las pilas.

Se desarrollaron ensayos de laboratorio de al menos doscientas muestras con el criterio anteriormente mencionado y se les efectuó la respectivo embalaje y traslado a los laboratorios.

Se efectuó la caracterización general de las muestras, ensayos de gradación, límites de consistencia, contenido de impurezas, equivalente de arena, desgaste, extracción, porcentaje de cementante y en general los ensayos utilizados establecidos en la norma, “para la adición de granulares”. Cabe recalcar que la norma pide los ensayos mencionados para los agregados de encaje y no para el RAP. No obstante, se quiere hacer un análisis de los materiales a partir de dichos resultados.

5.1.3. Tratamiento de los resultados

Con los resultados de laboratorio se efectuaron los respectivos encajes granulares en el porcentaje determinado por las franjas granulométricas promedio proveniente de las pilas mencionadas, es claro que el material granular de adición fue también caracterizado dando cumplimiento a los parámetros de calidad de la norma.

Con los materiales encajados se efectuaron los respectivos ensayos de diseño de mezclas por el método de inmersión compresión para diferentes porcentajes de adición de emulsión y de cemento hidráulico, haciendo un previo análisis del porcentaje de cemento asfáltico adicionado. Los porcentajes óptimos establecieron una fórmula de trabajo con la cual se realizó el tramo de prueba.

5.1.4. Las mezclas y su aplicación

El proceso de laboratorio fue acompañado de las recomendaciones constructivas y de manejo de los recursos, todo ello extractado de la literatura nacional y de los archivos de las entidades extranjeras que vienen desarrollando este tipo de actividades desde hace varias décadas.

5.2. TRABAJO DE LABORATORIO

Respecto de los ensayos de laboratorio se deben tener algunas precisiones referentes a la naturaleza propia del reciclaje. Si bien es cierto la caracterización establecida en la norma es especialmente aplicable a los agregados de adición y la granulometría es la única prueba que se especifica para caracterizar el RAP, por lo tanto, acudiendo a los ensayos convencionales para agregados crudos se efectuaron ensayos de caracterización convencional para conocer la naturaleza de los materiales a reciclar.

Figura 25. Muestra de RAP con diámetro máximo de 1"



En esta figura se observa una muestra de material de RAP pasado por el tamiz de 1" que en apariencia presentaría un aspecto adecuado para ser empleado como materia prima. ¿Respecto de los ensayos convencionales de laboratorio que se esperaría obtener de resultados?

Figura 26. Partículas del RAP.



Fuente: EL AUTOR

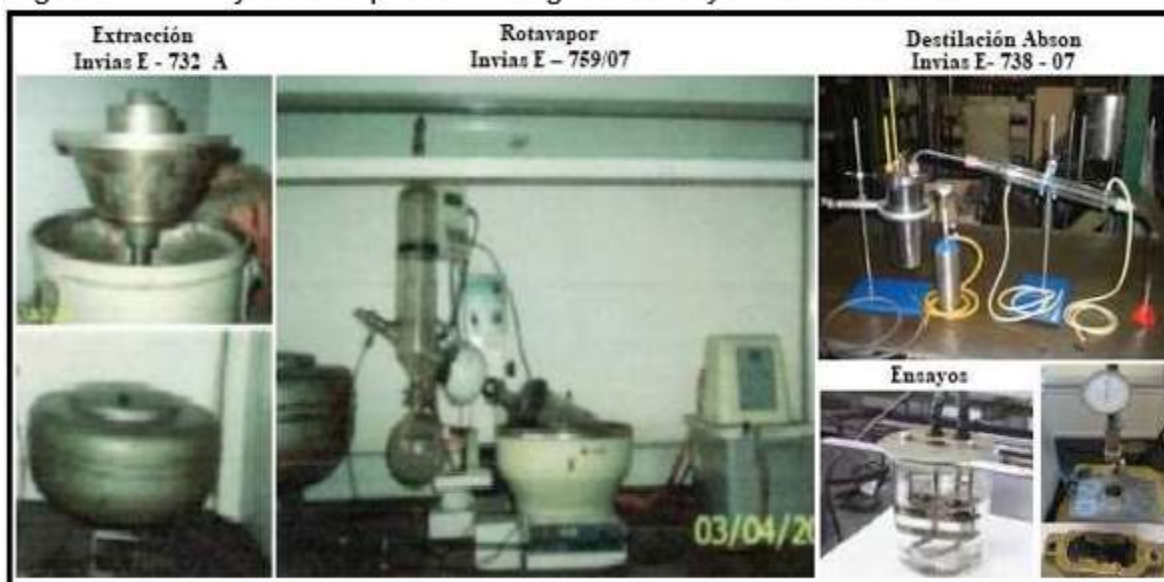
En el esquema de la Figura 26 se observa un procedimiento de arranque de material a través de una fresadora y en el detalle de la pila de la volqueta se aprecia un ejemplo de lo que se encuentra dentro de estos desechos. Las partículas de agregados disgregadas están embebidos dentro del cemento asfáltico envejecido estableciendo una gradación particular que depende de la

condición propia de la máquina fresadora y efectivamente es posible conseguir una franja granulométrica característica, no es así con un ensayo de desgaste ya que con los ciclos de rotación las partículas eventualmente se deforman en torno a sus núcleos y son muy pocas las que se sueltan, en un ensayo de equivalente de arena el líquido floculante no reacciona con se esperaría en una muestra de agregados crudos y los resultados arrojarían deficiencia de las arenas a pesar de encontrarse dentro de la masa de la partícula.

El ensayo de límites de consistencia no es posible realizarlo de manera normal, así como la solidez pues la composición química de la partícula tiene una reacción no prevista dentro del ensayo convencional.

En cuanto a los ensayos del material cementante, efectivamente es posible conocer, con alguna precisión, el porcentaje de material bituminoso remanente, en caso de querer conocer la naturaleza del cemento asfáltico, se tendría que realizar la extracción con di cloruro de metileno, recuperar el líquido resultante, efectuar una destilación al vacío por medio de rotavapor (Figura 27), Norma Invías E – 759/07 y con el bitumen resultante efectuar los respectivos ensayos de caracterización y envejecimiento, SARA o cualquier otro tipo de prueba reológicos que serían viables para profundizar la investigación, que es efectivamente lo que nos indica el nivel de envejecimiento de cementante y las posibles adiciones o combinaciones a realizar.

Figura 27. Ensayos de separación de granulares y bitumen del RAP



Fuente: EL AUTOR

Con las pruebas mencionadas es posible determinar las características de los materiales que componen el RAP. Se debe tener en cuenta que tanto el bitumen

como los agregados sufren algún cambio mínimo con estos ensayos, sin embargo, con ellos se pueden obtener resultados confiables en función de lo que se podría potencializar como investigación para la mejora de las mezclas en frío con reciclaje. Veamos a continuación los resultados de los ensayos realizados sobre los materiales y los aspectos de diseño tenidos en cuenta.

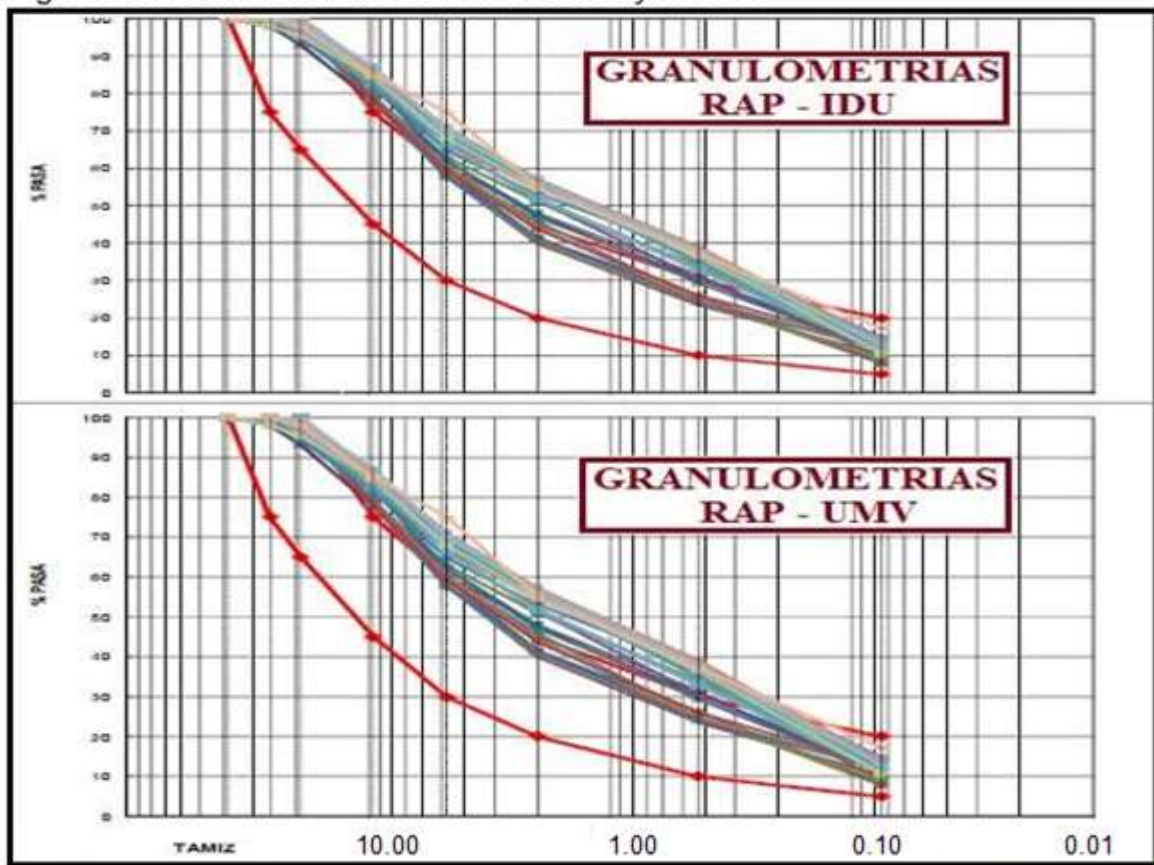
5.2.1. Gradación y encaje de los materiales

Se estableció el proceso de encaje de los agregados nuevos y del RAP, teniendo en cuenta los resultados de la granulometría de las muestras tomadas en los patios de reciclaje del IDU y la UMV del Distrito, con ello se buscó optimizar el diseño respecto de la cantidad de material granular virgen ya que este factor tiene incidencia en la cantidad de emulsión asfáltica empleada reduciendo su cantidad y generando una mezcla más económica. Las siguientes son las gradaciones de muestras tomadas del IDU y la UMV, Figura 28.

En el anexo 2 de este informe se observan los resultados de la caracterización de los materiales de adición, se trata de una sub base granular tipo B600 que se utilizó para mezclarla con el RAP y que como se observa, cumplió con los parámetros de calidad mínimos sugeridos por la norma.

El material de aporte nuevo es una base tipo B-600, caracterizada por una humedad del 7%, tener buena distribución granulométrica, NL-NP, clasificación GP-GM, equivalente de arena del 14%, desgaste en la máquina de Los Ángeles de 38%, pérdida en el aparato Micro Deval de 25.7%, 10% de finos F seca de 201.3 kN, F saturada de 139.1kN y relación $R = 69.1\%$, pérdida en sulfatos de 11.3% en la fracción gruesa y 7.8% en la fracción fina, 100% de caras fracturadas, índice de aplanamiento de 11, índice de alargamiento de 15, vacíos en agregado fino de 50.7%, terrones de arcilla y partículas deleznales de 0.03% en la fracción gruesa y 0.4% en la fracción fina. Densidad máxima Proctor de 21.01kN/m³ para humedad óptima de compactación 8.3%, CBR 83%.

Figura 28. Granulometrías del RAP del IDU y la UMV



Fuente: EL AUTOR

El resultado del análisis dejó ver la necesidad de adición de materiales granulares en diferente proporción y la necesidad de anular partículas de algunos tamaños que aun cuando se escogía la parte central de las pilas, persistía su presencia.

- Se pudo detectar la carencia de una franja granulométrica en los tamaños correspondientes a las arenas media y gruesa de tal forma que se agregó a este un porcentaje de material virgen que oscilaba alrededor del 15 al 20%, por el método del encaje granular.
- La misma clasificación estableció exceso de sobre tamaños por lo que fue necesario recomendar el cribado o retiro de estas partículas para tamaños superiores a 19,1 mm (3/4"), para conseguir un aspecto similar a la muestra de la figura 25.
- Con el propósito de hacer los diseños de las mezclas, se utilizaron los agregados con una gradación que pasa el tamiz de 1" de muestras traídas de la Unidad de Mantenimiento Vial del Distrito y del IDU.

5.2.2. Porcentajes de mezcla

El proceso nuevo involucró, en lo que respecta a los estudios y diseños los siguientes cambios:

- Adición de materiales granulares
- Adición de Cemento hidráulico
- Determinación de porcentajes óptimos de ligante
- Determinación de porcentajes de agua para humectación y manejabilidad

A fin de obtener los porcentajes óptimos y la fórmula de trabajo se realizaron los ensayos y se elaboraron diseños con el siguiente procedimiento:

Fresado UMV estabilizado con emulsión + 1.0% cemento Fresado

UMV estabilizado con emulsión + 1.5% cemento

Fresado UMV estabilizado con emulsión + 2.0% cemento

Fresado IDU + B600 estabilizado con emulsión + 1.0% cemento Fresado

IDU + B600 estabilizado con emulsión + 1.5% cemento Fresado IDU +

B600 estabilizado con emulsión + 2.0% cemento

Fresado UMV + B600 estabilizado con emulsión + 1.0% cemento

Fresado UMV + B600 estabilizado con emulsión + 1.5% cemento

Fresado UMV + B600 estabilizado con emulsión + 2.0% cemento

Control de inspección y ensayo fresado estabilizado

5.2.3. Criterios de diseño

Los parámetros básicos de diseño con forme a lo establecido en los documentos contractuales y especialmente a la necesidad que se tiene de conformar superficies de rodadura que tengan un servicio mínimo de dos (2) años, periodo en el cual se debería mantener la estabilidad de la mezcla teniendo en cuenta que este lapso de tiempo en un concreto asfáltico convencional, antes del primer mantenimiento, se esperaría que fuera de cinco (5) años, es decir asumimos un periodo de estabilidad teórico del 40% de este tiempo.

La densidad de tráfico de NT1 y el nivel de servicio D teniendo en cuenta que para este nivel de servicio se cualifica el flujo en función de la velocidad, tiempos de recorrido, libertad de maniobra, interrupciones a la circulación, comodidad, conveniencias y seguridad vial. En este sentido se considera que se puede circular con una densidad relativamente alta, una velocidad y capacidad de maniobras restringida debido a la geometría de este tipo de carreteras, nivel de comodidad y conveniencia bajo, aunque este criterio es algo discutible debido a que no puede ser establecido de acuerdo con la costumbre de tránsito sobre vías de bajos niveles de mantenimiento y un pequeño incremento de flujo podrían causar problemas de funcionamiento.

Un factor importante en este tipo de intervenciones es que las mezclas son muy susceptibles al daño por los cambios de saturación, razón por la cual las adecuadas condiciones de drenaje permiten una mayor duración de este material, de la misma forma la condición de la base es vital para su estabilidad el soporte continuo y firme debe ser un elemento que nunca debe faltar en los procesos de construcción.

Dentro de los parámetros de aplicación del RAP en el Distrito Capital se encuentra la especificación IDU-450-011 solamente como guía del procedimiento para realizar el diseño de la mezcla, pero no puede tener estricta aplicación ya que el fresado constituye un insumo de re - uso de diferente origen, composición y características heterogéneas en la producción.

En función de que se trata de una actividad de mantenimiento integral con el uso de mezcla asfáltica reciclada estabilizada con una garantía contractual que solo se limita a los insumos, de los cuales se exime el propio reciclado dado que proviene de una donación de una entidad estatal, con lo cual la entidad contratante está obligada a realizar un mantenimiento periódico a fin de mantener la transitabilidad de la red vial intervenida.

5.2.4. Diseño mezcla básico

Conforme a los resultados de las caracterizaciones de los materiales muestreados, al material RAP se determinó el contenido de asfalto residual teórico de 3.4% (valor real de 2.6%), la curva de distribución granulométrica dentro del huso de la norma IDU-450-011 y la humedad de pre envoltura de 4.5%. Se estimó el porcentaje teórico de emulsión asfáltica de 5.6% para una concentración de ésta de 63%.

Se fabricaron 6 briquetas para realizar los ensayos de inmersión - compresión para ensayo en condiciones curadas 14 días al aire y temperatura controlada de 25°C y

curadas 7 días al aire y 7 días sumergidas en agua, para el porcentaje teórico de emulsión asfáltica, +/- 1% y +/- 2% del mismo.

Se fabricaron 6 briquetas para realizar los ensayos de inmersión - compresión para ensayo en condiciones curadas 14 días al aire y temperatura controlada de 25°C y curadas 7 días al aire y 7 días sumergidas en agua, para el porcentaje teórico de emulsión asfáltica, +/- 1% y +/- 2% del mismo.

Se concluye que el porcentaje óptimo de emulsión encontrando en la curva de resistencia conservada vs. porcentaje de emulsión es 6.8% con un valor de resistencia a la compresión en condición seca de 32 kg/cm², resistencia conservada de 82%, humedad óptima de compactación de 6.7% para una densidad seca máxima de 2032 kg/cm³.

Los resultados verifican el cumplimiento de resistencia a la compresión en condición seca > 20 kg/cm² y resistencia conservada > 75%. Para tener en cuenta efectos de desperdicio, se recomienda un porcentaje óptimo de emulsión de 7.2% Para la densidad suelta de 1521 kg/cm³ y el porcentaje óptimo de emulsión de 7.2% se define la dosificación de 110 litros/m³ de material granular suelto.

Respecto del factor de compactación de laboratorio se calculó en 0,2514 por lo que los espesores de trabajo serían:

Suelto: 0,190 m. Compacto: 0,152 m

Se conformaron mezclas sin y con adición de granulares de aporte, estabilizadas con cemento y emulsión asfáltica, para cubrir los escenarios y mejorar el resultado de comportamiento del producto terminado, los ensayos de las combinaciones iniciales de éstos en proporciones en peso seco de cada, así:

Tabla 8. Composición diseño básico IDU y UMV

No.	MATERIALES					
	RAP (%)	ORIGEN	B-600 (%)	CEMENTO HIDRÁULICO (%) *		
1	100	UMV	0	1.0	1.5	2.0
2	80	IDU	20	1.0	1.5	2.0
3	80	UMV	20	1.0	1.5	2.0
* Medido en peso de los otros materiales						

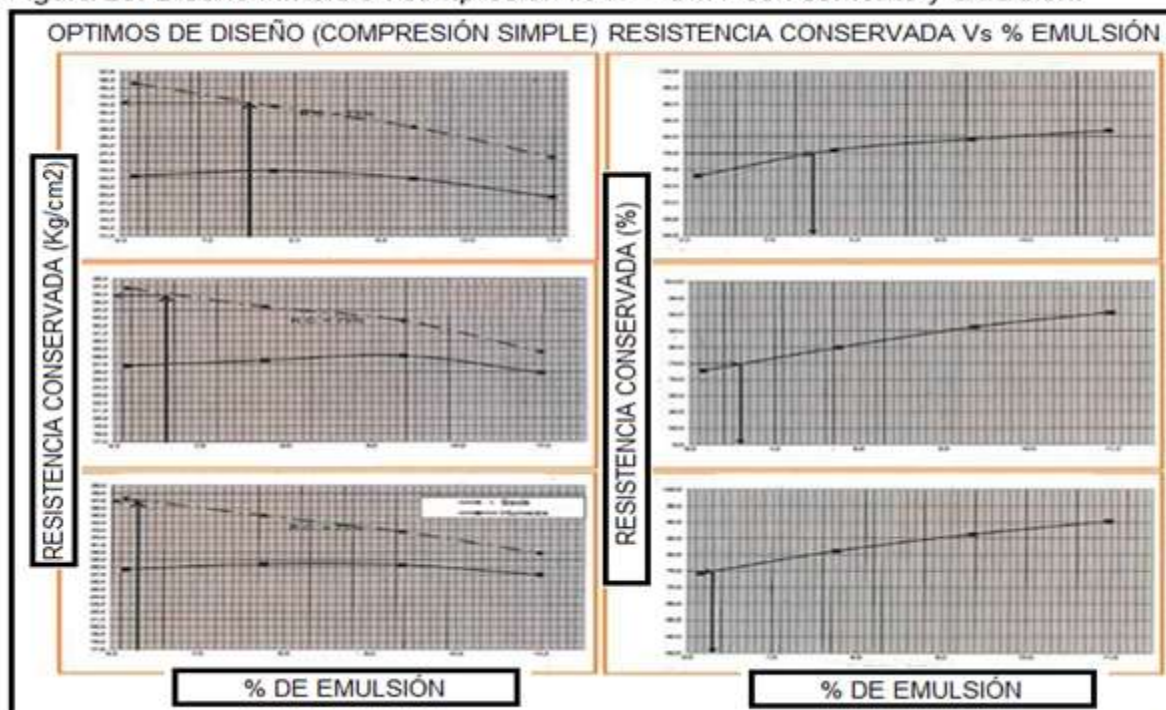
Fuente: El Autor

Los diseños de mezcla con fresado proveniente de la UMV en proporción del 100%, sin adición de granulares de aporte nuevos, con contenidos de cemento para las combinaciones 1, 2 y 3 correspondientes a 1.0, 1.5 y 2.0%, tiene la determinación del contenido óptimo de emulsión con un pequeño desperdicio (0.5%), como se presenta a continuación:

- Combinación 1: Contenido de emulsión óptimo de 7.6%, masa unitaria de 1516 kg/cm³, cantidad de emulsión de 102 lts/m³, humedad óptima de compactación 6.7%, resistencia seca 26 kg/cm², resistencia con inmersión de 19.6 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 75.38%.
- Combinación 2: Contenido de emulsión óptimo de 7.1%, masa unitaria de 1516 kg/cm³, cantidad de emulsión de 105 lts/m³, humedad óptima de compactación 6.9%, resistencia seca 27 kg/cm², resistencia con inmersión de 20.3 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 75.2%.
- Combinación 3: Contenido de emulsión óptimo de 7.2%, masa unitaria de 1516 kg/cm³, cantidad de emulsión de 111 lts/m³, humedad óptima de compactación 7.3%, resistencia seca 28.1 kg/cm², resistencia con inmersión de 21.0 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 74.7%.

La humedad de pre – envoltura fue 4.3% y el contenido de asfalto residual teórico fue 4.2%.

Figura 29. Diseño inmersión compresión RAP – UMV con cemento y emulsión.



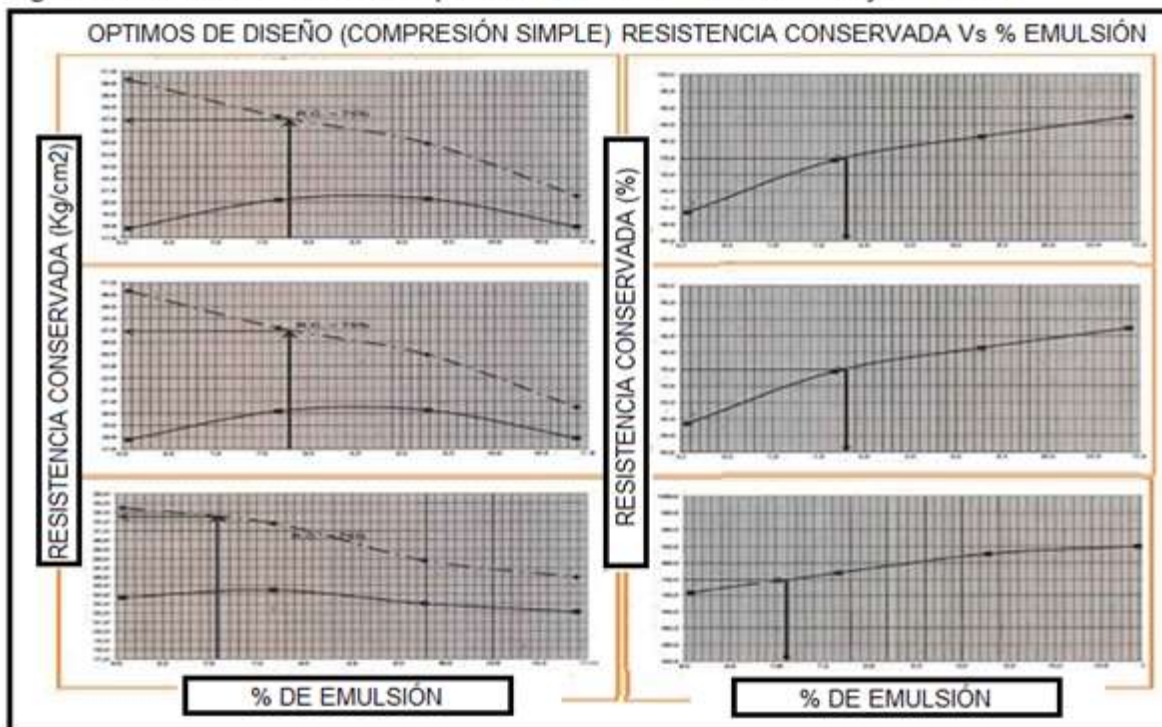
Fuente: EL AUTOR

5.2.5. Diseño de mezcla 20% IDU

En lo que respecta al diseño de mezclas con fresado IDU y 20% de B – 600 con combinaciones de cemento 1.0, 1.0 y 2.0 se tiene:

- Combinación 4: Contenido de emulsión óptimo de 8.3%, masa unitaria de 1568 kg/cm³, cantidad de emulsión de 116 lts/m³, humedad óptima de compactación 7.4%, resistencia seca 27.0 kg/cm², resistencia con inmersión de 23.0 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 85.2%.
- Combinación 5: Contenido de emulsión óptimo de 7.9%, masa unitaria de 1568 kg/cm³, cantidad de emulsión de 119 lts/m³, humedad óptima de compactación 7.6%, resistencia seca 28.2 kg/cm², resistencia con inmersión de 20.9 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 74.1%.
- Combinación 6: Contenido de emulsión óptimo de 7.6%, masa unitaria de 1568 kg/cm³, cantidad de emulsión de 124 lts/m³, humedad óptima de compactación 7.9%, resistencia seca 32.5 kg/cm², resistencia con inmersión de 24.4 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 75.1%. La humedad de pre – envoltura fue 4.8% y el contenido de asfalto residual teórico fue 4.8%.

Figura 30. Diseño inmersión compresión RAP – IDU con cemento y emulsión



Fuente: EL AUTOR

5.2.6. Diseño de mezcla 20% UMV

Los diseños de mezcla con fresado proveniente de la UMV en proporción del 20%, con adición de granulares de aporte nuevos B-600 en proporción del 20%, con

contenidos de cemento para las combinaciones 7, 8 y 9 correspondientes a 1.0, 1.5y 2.0%, tiene la determinación del contenido óptimo de emulsión con un pequeño desperdicio (0.5%), como se presenta a continuación:

- Combinación 7: Contenido de emulsión óptimo de 8.5%, masa unitaria de 1583 kg/cm³, cantidad de emulsión de 114 lts/m³, humedad óptima de compactación 7.2%, resistencia seca 33.2 kg/cm², resistencia con inmersión de 25.0 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 75.3%.
- Combinación 8: Contenido de emulsión óptimo de 7.6%, masa unitaria de 1583 kg/cm³, cantidad de emulsión de 119 lts/m³, humedad óptima de compactación 7.5%, resistencia seca 35.9 kg/cm², resistencia con inmersión de 27.0 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 75.2%.
- Combinación 9: Contenido de emulsión óptimo de 7.3%, masa unitaria de 1583 kg/cm³, cantidad de emulsión de 120 lts/m³, humedad óptima de compactación 7.6%, resistencia seca 36.8 kg/cm², resistencia con inmersión de 28.0 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 76.1%. La humedad de pre – envoltura fue 4.6% y el contenido de asfalto residual teórico fue 5.1%.

Tabla 9. Datos de los resultados de los diseños IDU y UMV

IDU				UMV			
% Cemento		1,0%		% Cemento		1,0%	
% Emulsión	R1	R2	%RC	% Emulsión	R1	R2	%RC
6,1	30,30	17,80	58,7	6,7	35,60	24,20	68,0
7,7	27,20	20,20	74,3	8,3	32,80	24,90	75,9
9,3	24,90	20,30	81,5	9,9	30,20	23,30	77,2
10,9	20,50	17,90	87,3	11,1	26,50	21,70	81,9
% Cemento		1,5%		% Cemento		1,5%	
% Emulsión	R1	R2	%RC	% Emulsión	R1	R2	%RC
6,1	31,90	20,75	65,0	6,7	36,80	26,80	72,8
7,7	29,50	22,35	75,8	8,3	34,40	27,50	79,9
9,3	26,35	21,65	82,2	9,9	32,60	28,10	86,2
10,9	22,75	19,95	87,7	11,1	28,60	25,80	90,2
% Cemento		2,0%		% Cemento		2,0%	
% Emulsión	R1	R2	%RC	% Emulsión	R1	R2	%RC
6,1	33,50	23,70	70,7	6,7	37,30	27,70	74,3
7,7	31,80	24,50	77,0	8,3	35,00	28,40	81,1
9,3	27,80	23,00	82,7	9,9	32,80	28,30	86,3
10,9	25,00	22,00	88,0	11,5	29,90	27,00	90,3

R1 y R2 Unidades: (Kg/cm²)

Fuente: EL AUTOR

5.2.7. Conclusiones de los diseños de mezclas

Los diseños de mezclas sin adición de granulares nuevos, pero sí de cemento (Combinaciones 1, 2 y 3), tienen cantidades de emulsión menores que el si los tienen, así como resistencias secas y con inmersión menores (Combinaciones 4, 5, 6, 7, 8 y 9), pero dentro del umbral de las especificaciones.

Los diseños de mezclas de RAP con adición de granulares nuevos B-600, cemento y emulsión asfáltica, tienen valores de cantidades de emulsión similares para origen del RAP IDU o UMV para el mismo contenido de cemento de 1.0 y 1.5% (Combinaciones 4, 5, 7 y 8). Para el contenido de cemento del 2.0% se tienen diferencias mayores de la cantidad de emulsión, de 124 lts/m³ para el fresado IDU más B-600 20% (Combinación 6) y 120 lts/m³ para el fresado UMV más B-600 20% (Combinación 9).

Las resistencias secas y con inmersión menores con mezclas de RAP con adición de granulares nuevos B-600, cemento y emulsión asfáltica, cuando el origen del RAP es UMV son mayores respecto a la fabricadas con el origen IDU.

En términos generales con la adición de los materiales granulares y el cemento hidráulico, las variables de resistencia se incrementan de manera importante. La resistencia del RAP del IDU se incrementó en 75% para el 1% de cemento, 69,1% para el 1,5% y 64,1% para el 2% de cemento hidráulico.

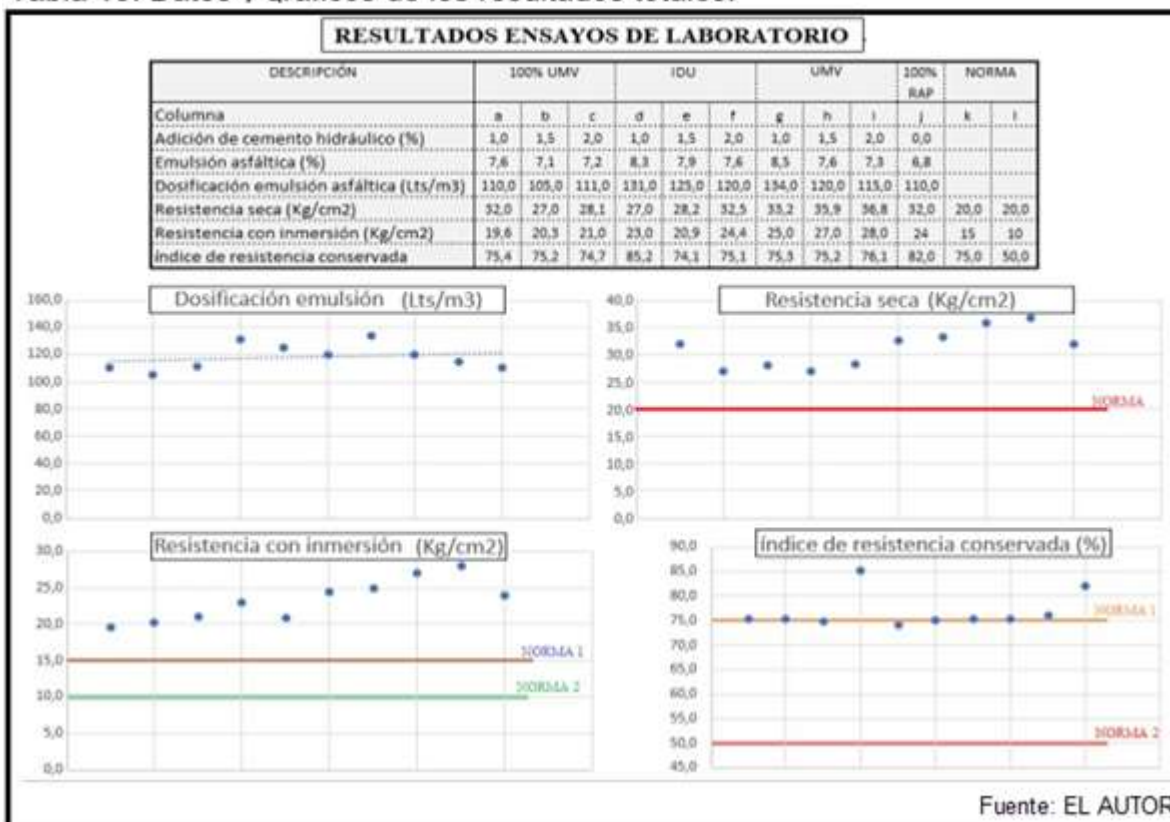
La resistencia del RAP del UMV se incrementó en 62% para el 1% de cemento, 59,3% para el 1,5% y 58,3% para el 2% de cemento hidráulico. El óptimo de cemento se encuentra en el 1% de cemento para los dos casos y los porcentajes de emulsión de la mezcla asfáltica para el IDU se incrementó en 6,5% y para la UMV en 13,3%, es decir, se necesitan 117 Lts/m³ para el RAP del IDU y 125 Lts/m³ para el RAP de la UMV.

En lo que hace referencia a algunos resultados de caracterización, como, por ejemplo, el equivalente de arena del RAP oscila entre 11 y 12%, cantidad muy alejada de los requerimientos de calidad de una base o sub base granular.

5.2.8. Parámetro de resistencia seca y resistencia conservada

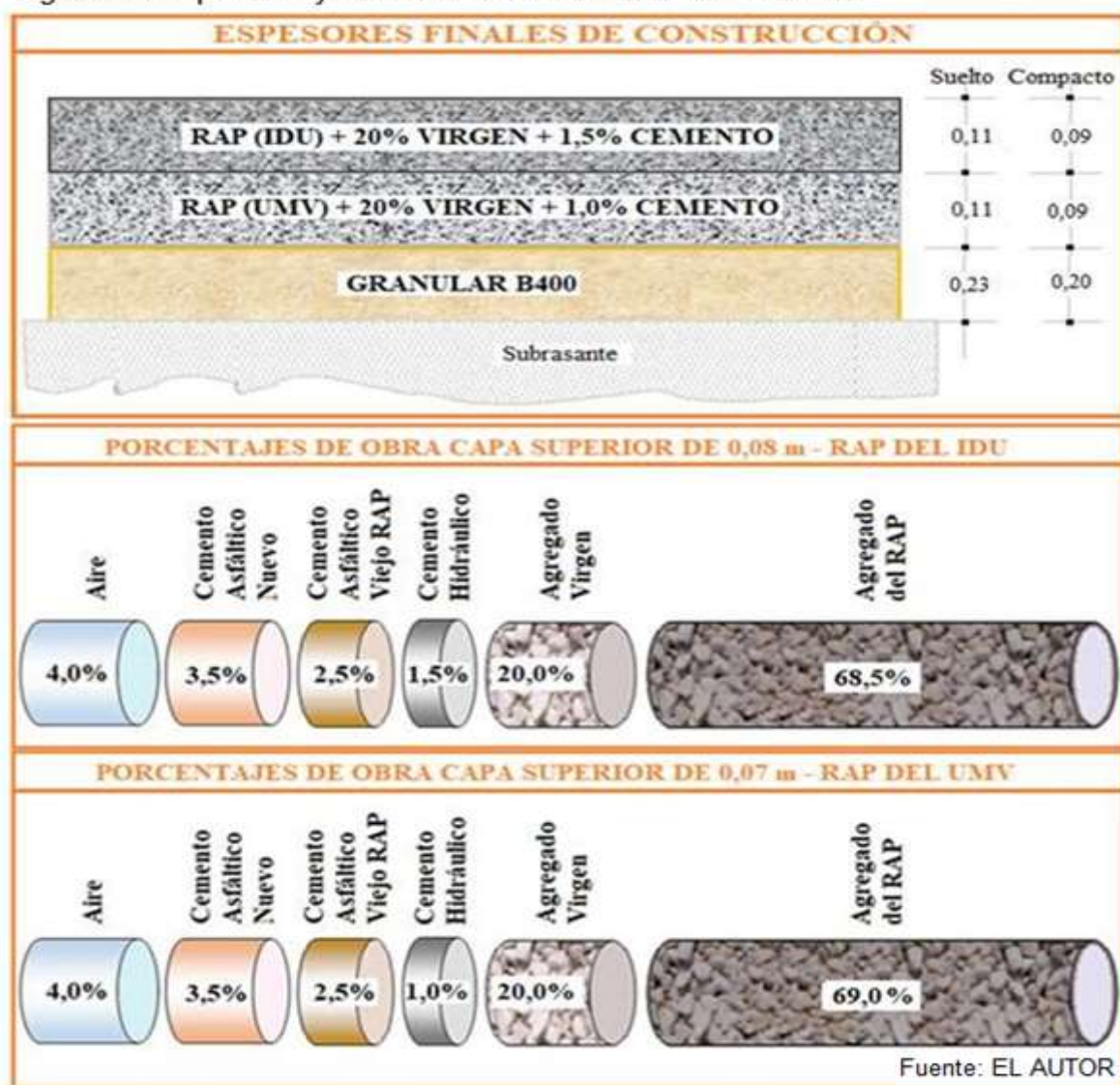
La investigación de laboratorio se centró para generar un parámetro de resistencia conservada de mínimo 75%, con lo cual los resultados finales con las adiciones del 20% de los materiales IDU o UMV dieron como resultado la siguiente matriz:

Tabla 10. Datos y gráficos de los resultados totales.



La tabla 10 deja ver el cumplimiento de los parámetros de resistencia en función del ensayo de inmersión compresión, así como la resistencia remanente o conservada luego de que los especímenes han sido sometidos a inmersión, de esta última variable se cumple por cerca del 25% más del valor mínimo y en cuenta al índice de resistencia está dentro de los valores esperados y muy por sobre el valor de 50% que se registra en la tabla de del artículo 400.1 (a) “Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas”, para nivel de tránsito NT1.

Figura 31. Espesores y dosificaciones finales de construcción



5.2.9. Diseño final adoptado

Luego de los ajustes finales y el chequeo con el método de inmersión compresión, se estableció un diseño óptimo Figura 31, con el que se cumplen los parámetros técnicos de estabilidad teórica que se materializaron en el tramo de prueba.

5.3. TRABAJOS DE CAMPO FASE I

Los trabajos de campo ya terminada la suspensión del contrato se materializó a través de informes complementarios en lo que se hacen las recomendaciones asociados a:

1. Construcción de filtros longitudinales a lo largo de los bordes internos de los taludes cerca de la calzada.
2. Mantenimiento de alcantarillas.
3. Conformación de calzada, con pendientes transversales y adecuación de bases de cunetas.
4. Los trabajos propios del tramo de prueba se realizaron en el PR 97+000 a PR98+000, de la vía Nueva Granada Tunal Alto, Corregimiento San Juan, tomando

5.3.1. Criterios de instalación de las mezclas

El proceso de construcción tuvo una importante variación ya que se cambió de manera drástica la manipulación de la mezcla y de sus agregados, su compactación y las adiciones propuestas. Es importante mencionar que el tramo de prueba permitió hacer ajustes adicionales, especialmente en los manejos del agua y la manejabilidad de la mezcla para así obtener condiciones de calidad superiores a las iniciales.

En la figura 32 se observa el aspecto de los materiales y los procesos adoptados, la mezcla se trasladó a un patio para efectuar el procedimiento de mezclado más eficiente, con lo cual se consiguió un producto mucho homogéneo, en este caso se trató de adoptar el método de separación por tamaños que establecen las normas de manejo de agregados de los Estados Unidos, dentro de los textos de referencia se pudieron extractar las siguientes características en el manejo de los materiales previo al proceso de construcción.

Figura 32. Proceso de mezcla en patio.



En el documento Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, establece procedimientos constructivos provenientes de estudios de más de 29 Estados que deberían ser integrados a las normas nacionales:

1. Es necesaria la separación de las fracciones del RAP en tamaños, una fracción gruesa que va de diámetros superiores a 1/2 ó 3/8" y una fracción fina de tamaños menores a estos diámetros en pilas separadas para mejorar el proceso de clasificación y mezcla.
2. El RAP más grueso, se debe someter a un proceso de trituración a fin de hacer separación de fracciones tal como se hace con la elaboración de mezclas con granulares vírgenes y aprovechar de mejor manera este material
3. Las fracciones permisibles dentro de una mezcla asfáltica oscilan entre 20 y 50%, existe diferencia entre los diferentes estados, algunos de

4. En la Figura 33 se observa el proceso general de aprovechamiento y manejo del RAP en caliente, se muestra la trituración (que puede ser cribado), separación en tamaños, dosificación en planta, adición de rejuvenecedores, mezcla en el tambor de la planta e instalación.

El diagrama de flujo ilustra el proceso de producción de asfalto:

- TRITURACIÓN:** Muestra una máquina trituradora de piedra.
- SEPARACIÓN:** Muestra una pila de material que se está separando.
- DOSIFICACIÓN:** Muestra una cinta transportadora que lleva material a una tolva.
- COLOCACIÓN:** Muestra una máquina colocadora de asfalto.
- ADICIÓN:** Muestra un camión mezclador que está añadiendo material a la tolva.
- REJUV.:** Representado por un símbolo de hexágono con una flecha que apunta hacia el proceso de colocación.

Fuente: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration

83

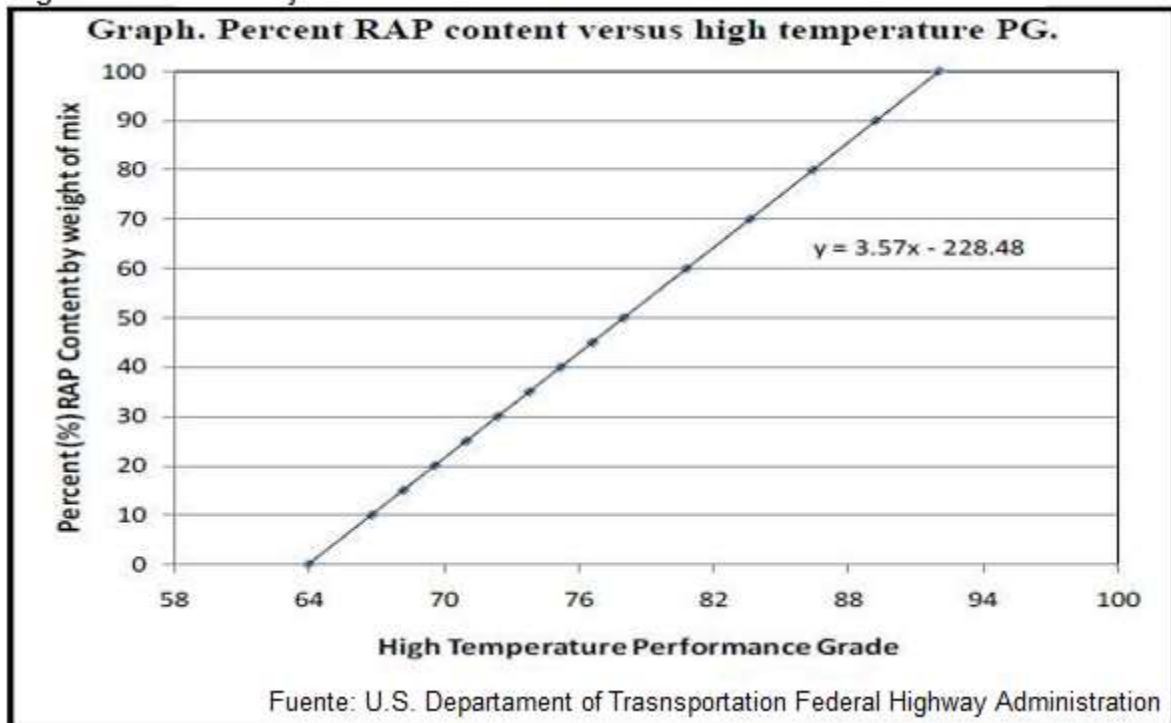
Figura 34. Almacenamiento del RAP.



6. La norma AASTHO M323 establece, para mezclas en caliente, porcentajes de adición de RAP superiores al 25%, se debe analizar la naturaleza del cemento asfáltico residual del reciclaje, en la medida que se incrementa su rigidez se incrementa la posibilidad de ser utilizado como parte del agregado.

7. El fundamento del uso del reciclaje en las mezclas en caliente, para la normativa americana se basa en que desde el punto de vista molecular, el envejecimiento del cemento asfáltico se traduce en un aumento de asfaltenos dentro de la masa del bitumen y disminución de málenos, tendiendo a ser los primeros los elementos sólidos de cementante, por tal razón a más envejecido el cemento asfáltico mayor es la posibilidad de incrementar el porcentaje de RAP en una mezcla convencional, En la figura 35 se puede observar la relación entre el porcentaje de RAP a utilizar en la mezcla y condición del material cementante remanente y el grado PG con que se analiza el bitumen.

Figura 35. Porcentaje de RAP Vs Grado PG del cementante.



8. Es claro que el uso de un cemento asfáltico nuevo con un remanente de cemento asfáltico envejecido genera un nuevo material cementante en el cual se combinan las cualidades reológicas de los dos y seguramente se reduce de manera proporcional, el tiempo de servicio del cemento adicionado. En las normas de los Estados Unidos existe una relación matemática que establece estos periodos de probable duración basados en las mediciones de los módulos dinámicos de cada una de ellas y los respectivos modelos de relación (Hirsch y Witczak).

5.3.2. Evaluación de la mezcla en los primeros tramos

Luego de efectuado el inicio en los diferentes tramos se tomaron muestras de las mezclas instaladas con el diseño y mediante el ensayo de inmersión compresión de tomaron los registros de resultados así:

- Tramo 1: Corregimiento San Juan en la Vereda Nueva Granada al cruce de la Vereda Tunal Alto: Resistencia seca de 24.9 kg/cm², resistencia con inmersión de 19.6 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 76.53%. RAP origen IDU.

- Tramo 3: Corregimiento Nazareth desde el Centro Poblado a la Vereda Raizal; Resistencia seca de 25.3 kg/cm², resistencia con inmersión de 19.2 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 75.82%. RAP origen UMV.
- Tramo 5: Corregimiento Nazareth desde el Centro Poblado a la Vereda Ríos; Resistencia seca de 25.14 kg/cm², resistencia con inmersión de 19.25 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 76.57%. RAP origen IDU.
- Tramo 6: Corregimiento Nazareth desde el Cruce Raizal a la Vereda Peña lisa; Resistencia seca de 26.69 kg/cm², resistencia con inmersión de 20.21 kg/cm² e índice de resistencia conservada de 75.73%. RAP origen UMV.

En la siguiente figura se observa el proceso de construcción de la estructura de la capa de pavimento de RAP con los ajustes y las modificaciones que se involucraron luego de la gestión de cambios del contrato intervenido bajo la investigación aplicada.

1. Luego del respectivo proceso de mezclado en patio o en el sitio, la mezcla de los materiales es homogenizada hasta conseguir una textura y composición adecuada.
2. La instalación, si se ha hecho en patio de mezclado, se hace mediante volquetas que acordonan el material en el sitio especificado y se hace a calzada completa.
3. Se conforma con el uso de motoniveladora con forme a los parámetros de topografía y sobre una base adecuadamente perfilada y densificada.
4. Luego de seriada se realiza su compactación, se debe tener en cuenta por el espesor de la capa no debe ser mayor a los 0,10 m, en este caso fue de 0,09 dado que se trató de dos (2) capas.
5. El curado, es un proceso de especial atención y se dejan al menos tres (3) horas iniciales, luego de dar la vía al tránsito los vehículos deben circular a una velocidad media de 30 kpm y, en este caso, se dejaron cinco (5) días antes de la instalación de la segunda capa.
6. El sellado consiste en que un (1) día después de instalado se debe volver a pasar el compactador “sin vibrar” a fin de perfilar la superficie ya que con el paso de tránsito y el proceso de curado se forman pequeños ahuellamientos superficiales, este procedimiento se repitió hasta que alcanzó su dureza.

7. El aspecto final, si se han tenido en cuenta las recomendaciones y cuidados, es una superficie regular, algo rugosa y eventualmente con algunas fisuras, que en general, se sellan con el paso de los vehículos.

Figura 36. Instalación de la mezcla.



El registro fotográfico muestra el ciclo de elaboración de las mezclas con base de RAP, desde la instalación luego de la mezcla en patio o en vía, continua conformación, curado inicial, sello de la mezcla, curado final y el aspecto del terminado.

5.3.3. Desarrollo del curado

En cuanto al tiempo de curado se pudo observar que durante varios días el aspecto de la superficie aparecía saturado y blando, Figura 37, con el tiempo fue ganando resistencia hasta que se redujo la deformación y con el paso del vibro se borraron los defectos superficiales y quedó estable.

Figura 37. Aspectos del desarrollo del curado de la mezcla



En el registro fotográfico se observan las etapas de curado y la condición de humectación que deja ver la superficie del material en el tiempo, luego de instaladas las dos capas de mezcla. Se dieron dos procesos de compactación, el inicial, rápido y buscando asegurar la homogeneidad en la regularidad superficial de la carpeta y una final, pasados varios días de curado se logró conseguir una especie de sellado final puesto que en los primeros días se formaron surcos longitudinales, como se observa en la fotografía de la izquierda que, con el tiempo y paso del compactador, sin vibrar, fueron desapareciendo.

En la figura 38 se puede apreciar el aspecto final del pavimento luego de pasados dos meses de su construcción, cuando la humedad ha desaparecido de su superficie (1), aquí se muestra una comparación con un pavimento en caliente (2), construido con materiales convencionales, a través de lo cual se pueden contrastar los resultados del proceso. A simple vista no existe gran diferencia respecto de su regularidad superficial y el aspecto de la mezcla, al menos durante sus primeros meses.

Figura 38. Aspecto final del pavimento (1) y su contraste con un pavimento convencional (2).



Luego del proceso de instalación de la mezcla con RAP, el aspecto final unos meses despues, deja ver cierta similitud con un concreto asfaltico convencional. La fotografia de la izquierda muestra el pavimento con RAP y el de la derecha la mezcla normal.

6. SEGUIMIENTO AL PAVIMENTO CON DOS AÑOS DE CONSTRUCCIÓN

En desarrollo de la segunda etapa de la investigación y buscando cumplir con el objeto planteados, en este capítulo se muestran los resultados de los procesos de auscultación del pavimento, inspecciones visuales, medición de índices de deterioro, deflectometría y toma de muestras luego de dos (2) años de la construcción del pavimento.

Inicialmente se hará una inspección visual y un levantamiento de fallas, en una longitud de 4.000. m., correspondiente a la Vía Granada – El Tunal, Corregimiento San Juan, Localidad de Sumapaz, en la Ciudad de Bogotá ya que es en este tramo donde se aplicaron de manera concreta los parámetros de diseño y construcción encontrados, desde la adecuación de las obras de drenaje, instalación de la base B-400 hasta la instalación de la mezcla con RAP.

6.1. EVALUACIÓN SUPERFICIAL

Se efectuaron las visitas de campo para el levantamiento de la información a mediados del mes de marzo de 2019, en la Figura 39 se observa el aspecto del pavimento y de algunas de las fallas encontradas. Los siguientes son los parámetros evaluados.

6.1.1. Resultados de la inspección visual

Se examinarán los parámetros funcional y estructural del pavimento, en primera instancia desde el punto de vista funcional, el inventario de fallas quedo tabulado en la Tabla 2. Se tuvieron en cuenta las siguientes patologías del pavimento:

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| 1. Fisura longitudinal. | 4. Ahuellamientos |
| 2. Fisura transversal. | 5. Pérdida de ligante |
| 3. Piel de cocodrilo. | 6. Exudación |

Figura 39. Patologías de daño superficial.



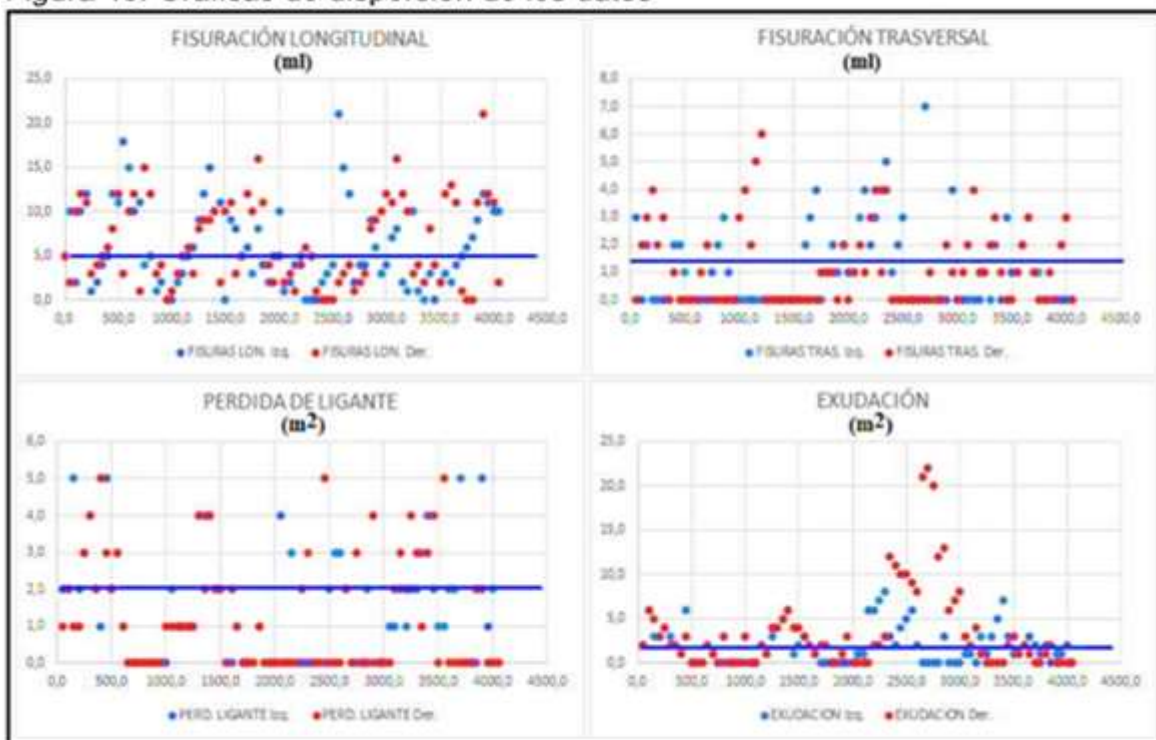
Como se aprecia en las diferentes fotografías, existen fallas puntuales que estarían asociadas a los procesos constructivos, como es el caso de las exudaciones, las fisuras son patologías que se esperan estén presentes en esta etapa del pavimento y algunas no necesariamente están ligadas al material, sino que a la deficiencia de los drenajes sub superficiales, Fotografía inferior derecha.

		MAESTRIA EN INFRAESTRUCTURA VIAL																																												
LEVANTAMIENTO DE DAÑOS																																														
Dirección de la medición		NORTE A SUR																																												
ABSCISAS	UN.	K96+000	K96+050	K96+100	K96+150	K96+200	K96+250	K96+300	K96+350	K96+400	K96+450	K96+500	K96+550	K96+600	K96+650	K96+700	K96+750	K96+800	K96+850	K96+900	K96+950	K97+000	K97+050	K97+100	K97+150	K97+200	K97+250	K97+300	K97+350	K97+400	K97+450	K97+500	K97+550	K97+600	K97+650	K97+700	K97+750	K97+800	K97+850	K97+900	K97+950	K98+000	SUMAS			
CALZADA	EQ	Fisuras lon.	m1	5,0	10,0	2,0	10,0	12,0	1,0	2,0	4,0	5,0	12,0	11,0	18,0	15,0	10,0	11,0	4,0	5,0	1,0	2,0	0,0	0,0	2,0	3,0	5,0	6,0	9,0	12,0	15,0	10,0	11,0	0,0	9,0	8,0	5,0	6,0	3,0	8,0	4,0	2,0	5,0	10,0	273,0	
		Fisuras tras.	m1	0,0	3,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	3,0	4,0	0,0	2,0	2,0	1,0	2,0	1,0	0,0	35,0		
		Piel de cocodrilo	m2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Ahuellamientos	m2	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
		Pérdida de ligante	m2	3,0	2,0	2,0	5,0	2,0	3,0	4,0	2,0	1,0	5,0	2,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	4,0	4,0	4,0	2,0	2,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,0
		Exidación	m2	0,0	2,0	6,0	3,0	3,0	4,0	3,0	2,0	1,0	6,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	3,0	4,0	5,0	6,0	1,0	2,0	3,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	65,0	
CALZADA	DRE	Fisuras lon.	m1	5,0	2,0	10,0	12,0	11,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	12,0	3,0	10,0	12,0	1,0	15,0	12,0	3,0	4,0	0,0	1,0	3,0	5,0	6,0	3,0	8,0	9,0	9,0	10,0	2,0	10,0	11,0	3,0	5,0	12,0	10,0	16,0	11,0	4,0	2,0	5,0	283,0	
		Fisuras tras.	m1	0,0	0,0	2,0	3,0	4,0	2																																					

Fuente: EL AUTOR

De las patologías evaluadas se pudo detectar una mayor intensidad en lo que hace referencia a fisuración, pérdida de ligante y exudación, el grafico de dispersión de los datos, Figura 40, deja ver la distribución espacial de cada una de las patologías en función de su dimensión.

Figura 40. Gráficas de dispersión de los datos



Fuente: El Autor

6.1.2. Factores índices

De acuerdo con el Manual de Rehabilitación del INVIAS, se establece una metodología para la evaluación de los daños de los pavimentos desde el punto de vista visual, el llamado “Índice de deterioro superficial”, que es el primer aspecto para tener en cuenta para la evaluación global del pavimento.

Se configuran dos tipos de parámetros dentro del deterioro superficial, la deformación y la fisuración, en el caso que nos ocupa vemos que la deformación es muy baja y a pesar de que existe fisuración, sus valores se encuentran dentro de un valor relativamente bajo y la magnitud de sus fisuras permite establecer que es un grado entre medio y bajo de severidad, en este sentido y de acuerdo al porcentaje establecido, inferior al 10% ya que 5/200, es realmente bajo, nos encontramos dentro de un $id = 1$ y un $if = 1$, de tal forma que el índice de deterioro superficial calculado de esta manera nos determina un valor de índice de deterioro superficial $Is = 3$.

Por lo anterior, se esperaría que para un pavimento convencional las fisuras estuvieran asociados a procesos de tipo estructural y con poca o ninguna deformación y la intervención de recuperación hace referencia a tratamientos de mediana intensidad.

Cabe recalcar que la evaluación se está haciendo a un pavimento de RAP, así es que existen algunas limitaciones en la interpretación de los resultados y la fisuración no solo tiene el origen establecido por la Guía, sino que también por la tendencia química que tiene el material bituminoso a cristalizarse debido al envejecimiento eventual implícito del material. Una patología presente en algunos sitios específicos del pavimento es la presencia de caras duras Figura 41, que no es común encontrar en los tramos intervenidos.

Es de esperarse que existan ciertas diferencias en la evaluación física y mecánica de las mezclas ya que el RAP tiene un origen muy variado y por lo tanto los resultados pueden presentar fluctuaciones importantes, por lo tanto, la regularidad y la textura de la mezcla nunca será homogénea y como en este caso hay ciertos patrones de patologías que son comunes en algunos sectores específicos, como vemos en las siguientes fotografías.

Figura 41. Pérdida de ligante.



Fuente: EL AUTOR

En esta fotografía se observa la patología de caras duras o pérdida de ligante, el primero por la abrasión propia del deterioro en el uso y la otra por defectos constructivos, en ambos casos el pavimento circundante muestra un aspecto de regularidad superficial adecuado.

Figura 42. Aspecto general de la regularidad superficial del pavimento.



Fuente: EL AUTOR

Se puede apreciar una adecuada condición superficial y más si se tiene en cuenta que han pasado más de dos (2) años de construcción (2017), solo el extremo lateral cerca de las cuneras presenta alguna diferencia en su apariencia dado que se trata del relleno de las obras de drenaje. Esta fotografía se tomó en el momento en que se está pasando la Viga Benkelman.

6.2. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

Para la evaluación estructural se tuvieron en cuenta ensayos de deflectometría mediante Viga Benkelman y algunos núcleos que pudieron ser extraídos del pavimento construido.

6.2.1. Extracción de núcleos

Con el objeto de verificar los espesores estructurales del pavimento, se efectuó un muestreo general en diferentes sitios del corredor vial analizado. Dada la integridad de dichos núcleos podemos concluir que el proceso constructivo adoptado sirvió para asegurar la homogeneidad estructural de la mezcla.

Figura 43. Proceso de extracción de núcleos.



Fuente: EL AUTOR

Se tomaron cinco (5) cilindros con medidas de 0,15, 0,17, 0,17, 0,18 y 0,20 m de espesor y como se observa en la parte baja se encontró en material granular de base, lo cual indica la integridad de las capas y el adecuado proceso de compactación que se dio en su momento.

6.2.2. Caracterización deflectométrica

Hace referencia a los ensayos estructurales no destructivos que permiten conocer la condición estructural del pavimento, en la Guía de Rehabilitación de INVIAS, este procedimiento está encaminado a determinar la capacidad residual del pavimento.

Se efectuó medición deflectométrica del tramo en estudio en una longitud de 4000 m, desde el K96+000 AL K100+000, con longitudes de toma de datos de 50 m en eje izquierdo centro y eje derecho en las huellas de cada carril, Figura 44.

Figura 44. Ensayos de deflectometría



Las fotografías muestran el proceso de toma de datos del ensayo deflectométrico con viga Benkelman, toma de temperatura del piso, ubicación y medición.

Se tomaron las respectivas deflexiones D_0 y D_{25} registrando las temperaturas del pavimento. En las siguientes páginas se aprecian los registros de la cartera inicial, los ajustes por temperatura y clima así, sectorización de deflexiones medias por tramo radios de curvatura como las determinaciones de las deflexiones media, deflexión característica y las determinaciones con las cuales se puede hacer una caracterización estructural del pavimento existente, en contraste con la evaluación superficial del concreto asfáltico construido con residuos de frezado estabilizados, Tabla 12.

Tabla 12. Tabla de ensayos de deflectometría.

RESULTADOS DE DEFLEXIÓN Y RADIOS DE CURVATURA
GRANADA - EL TUNAL (K96+000 a K100+000)

CODIGO	DATOS INICIALES DE CAMPO	CARTERA CALCULADA	PR -	0+000
CARRRETERA:	GRANADA - EL TUNAL	ABSCISA INICIAL:	PR -	4+000
SECTOR:	GRANADA - SUMAPAZ	ABSCISA FINAL :		4000,00 mts
DISTRITO:	EDU	LONGITUD:		18 cm
CARRIL:	DERECHO	ESPESOR DE LA CARPETA:		03/03/2019
INGENIERO	ROBINSON VILLAMIL ROJAS	FECHA EVALUACION:		

ABSCISA	HUELLA EXTERNA		HUELLA INTERNA		Temp °C	DEFLEXIONES (1/100mm)				RADIO DE CURVATURA				OBSERVACIONES
	Do	D25	Do	D25		HUELLA EXTERNA		HUELLA INTERNA		D25		RC [m]	[D-45]'	
						Medida Corr.	Medida Corr.	Medida Corr.	Medida Corr.					
0	15	10	10	5	19	152,4	155	101,6	103	101,6	103	60,1	3052,0	
50	10	5	0	0	19	101,6	103	0	0	50,8	52	61,3	19,8	Microfisuras
100	8	4	0	0	19	81,3	82	0	0	40,6	41	76,2	252,0	
150	10	5	0	0	19	101,6	103	0	0	50,8	52	61,3	19,8	
200	10	4	0	0	19	101,6	103	0	0	40,6	41	50,4	19,8	
250	8	4	0	0	19	81,3	82	0	0	40,6	41	76,2	252,0	Microfisuras
300	10	5	0	0	19	101,6	103	0	0	50,8	52	61,3	19,8	
350	8	4	0	0	19	81,3	82	0	0	40,6	41	76,2	252,0	
400	8	4	0	0	19	81,3	82	0	0	40,6	41	76,2	252,0	
450	10	5	0	0	19	101,6	103	0	0	50,8	52	61,3	19,8	
500	10	5	0	0	21	101,6	100	0	0	50,8	50	62,5	19,8	
550	5	3	0	0	21	50,8	50	0	0	30,5	30	156,3	2148,8	Microfisuras
600	8	4	0	0	21	81,3	80	0	0	40,6	40	78,1	252,0	
650	5	3	0	0	21	50,8	50	0	0	30,5	30	156,3	2148,8	
700	15	8	0	0	21	152,4	150	0	0	81,3	80	44,6	3052,0	
750	7	3	0	0	21	71,1	70	0	0	30,5	30	78,1	677,8	
800	10	5	0	0	21	101,6	100	0	0	50,8	50	62,5	19,8	Microfisuras
850	8	4	0	0	21	81,3	80	0	0	40,6	40	78,1	252,0	
900	10	5	0	0	21	101,6	100	0	0	50,8	50	62,5	19,8	
950	8	4	0	0	21	81,3	80	0	0	40,6	40	78,1	252,0	
1000	8	4	13	7	24	81,3	77	152,4	144	40,6	38	80,1	252,0	
1050	10	5	0	0	24	101,6	96	0	0	50,8	48	65,1	19,8	
1100	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
1150	10	5	0	0	24	101,6	96	0	0	50,8	48	65,1	19,8	
1200	10	5	0	0	24	101,6	96	0	0	50,8	48	65,1	19,8	
1250	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
1300	5	2	0	0	24	50,8	48	0	0	20,3	19	107,8	2148,8	
1350	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
1400	15	8	0	0	24	152,4	144	0	0	81,3	77	46,6	3052,0	
1450	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
1500	15	8	20	8	31	152,4	132	203,2	175	81,3	70	50,4	3052,0	Exudacion
1550	10	5	0	0	31	101,6	88	0	0	50,8	44	71,0	19,8	
1600	6	3	0	0	31	61,0	53	0	0	30,5	26	115,7	1310,1	
1650	8	4	0	0	31	81,3	70	0	0	40,6	35	89,3	252,0	
1700	15	8	0	0	31	152,4	132	0	0	81,3	70	50,4	3052,0	
1750	10	5	0	0	31	101,6	88	0	0	50,8	44	71,0	19,8	
1800	10	4	0	0	31	101,6	88	0	0	40,6	35	59,0	19,8	
1850	10	4	0	0	31	101,6	88	0	0	40,6	35	59,0	19,8	
1900	8	4	0	0	31	81,3	70	0	0	40,6	35	89,3	252,0	
1950	10	5	0	0	31	101,6	88	0	0	50,8	44	71,0	19,8	
2000	8	4	15	7	24	81,3	77	152,4	144	40,6	38	80,1	252,0	



RESULTADOS DE DEFLEXION Y RADIOS DE CURVATURA
GRANADA - EL TUNAL (K96+000 a K100+000)

CODIGO	DATOS INICIALES DE CAMPO	CARTERA CALCULADA	
CARRRETERA:	GRANADA - EL TUNAL	ABSCISA INICIAL:	PR - 0+000
SECTOR:	GRANADA - SUMAPAZ	ABSCISA FINAL :	PR - 4+000
DISTRITO:	IDO	LONGITUD:	4000,00 mts
CARRIL:	DERECHO	ESPESOR DE LA CARPETA:	18 cm
INGENIERO	RODRIGON VILLAMIL ROJAS	FECHA EVALUACION:	03/03/2019

ABSCISA	HUELLA EXTERNA		HUELLA INTERNA		Temp	DEFLEXIONES [1/100mm]				RADIO DE CURVATURA				OBSERVACO
	D ₀	D ₂₅	D ₀	D ₂₅	°C	HUELLA EXTERNA		HUELLA INTERNA		D ₂₅		RC	(D-g) ²	
						Medida Cor.	Medida Cor.	Medida Cor.	(m)					
2000	8	4	15	7	24	81,3	77	152,4	144	40,6	38	80,1	252,0	
2050	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
2100	8	5	0	0	24	81,3	77	0	0	50,8	48	107,8	252,0	
2150	8	5	0	0	24	81,3	77	0	0	50,8	48	107,8	252,0	
2200	8	5	0	0	24	81,3	77	0	0	50,8	48	107,8	252,0	
2250	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
2300	5	2	0	0	24	50,8	48	0	0	20,3	19	107,8	2148,8	
2350	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
2400	15	8	0	0	24	152,4	144	0	0	81,3	77	46,6	3052,0	Microfisuras
2450	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
2500	15	8	20	8	31	152,4	132	203,2	175	81,3	70	50,4	3052,0	Fisuras
2550	10	5	0	0	31	101,6	88	0	0	50,8	44	71,0	19,8	
2600	15	8	0	0	31	152,4	132	0	0	81,3	70	50,4	3052,0	
2650	12	6	0	0	31	121,9	105	0	0	61,0	53	60,1	613,3	
2700	10	5	0	0	31	101,6	88	0	0	50,8	44	71,0	19,8	
2750	8	4	0	0	31	81,3	70	0	0	40,6	35	89,3	252,0	
2800	15	10	0	0	31	152,4	132	0	0	101,6	88	71,0	3052,0	Microfisuras
2850	10	5	0	0	31	101,6	88	0	0	50,8	44	71,0	19,8	
2900	15	10	0	0	31	152,4	132	0	0	101,6	88	71,0	3052,0	
2950	10	5	0	0	31	101,6	88	0	0	50,8	44	71,0	19,8	
3000	10	6	12	6	24	101,6	96	121,92	115	61,0	58	82,2	19,8	
3050	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	Microfisuras
3100	7	3	0	0	24	71,1	67	0	0	30,5	29	82,2	677,8	
3150	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
3200	10	5	0	0	24	101,6	96	0	0	50,8	48	65,1	19,8	
3250	10	5	0	0	24	101,6	96	0	0	50,8	48	65,1	19,8	
3300	12	6	0	0	24	121,9	115	0	0	61,0	58	54,8	613,3	
3350	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	Microfisuras
3400	9	4	0	0	24	91,4	86	0	0	40,6	38	65,1	32,7	
3450	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
3500	6	3	8	4	24	61,0	58	81,28	77	30,5	29	107,8	1310,1	
3550	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
3600	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
3650	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
3700	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	
3750	8	4	0	0	24	81,3	77	0	0	40,6	38	80,1	252,0	Microfisuras
3800	10	5	0	0	24	101,6	96	0	0	50,8	48	65,1	19,8	
3850	10	5	0	0	24	101,6	96	0	0	50,8	48	65,1	19,8	
3900	10	5	0	0	24	101,6	96	0	0	50,8	48	65,1	19,8	
3950	10	5	0	0	24	101,6	96	0	0	50,8	48	65,1	19,8	
4000	10	5	8	3	27	101,6	92	81,28	74	50,8	46	67,9	19,8	
SUMAS						7772,4							52968,0	

Fuente: EL AUTOR

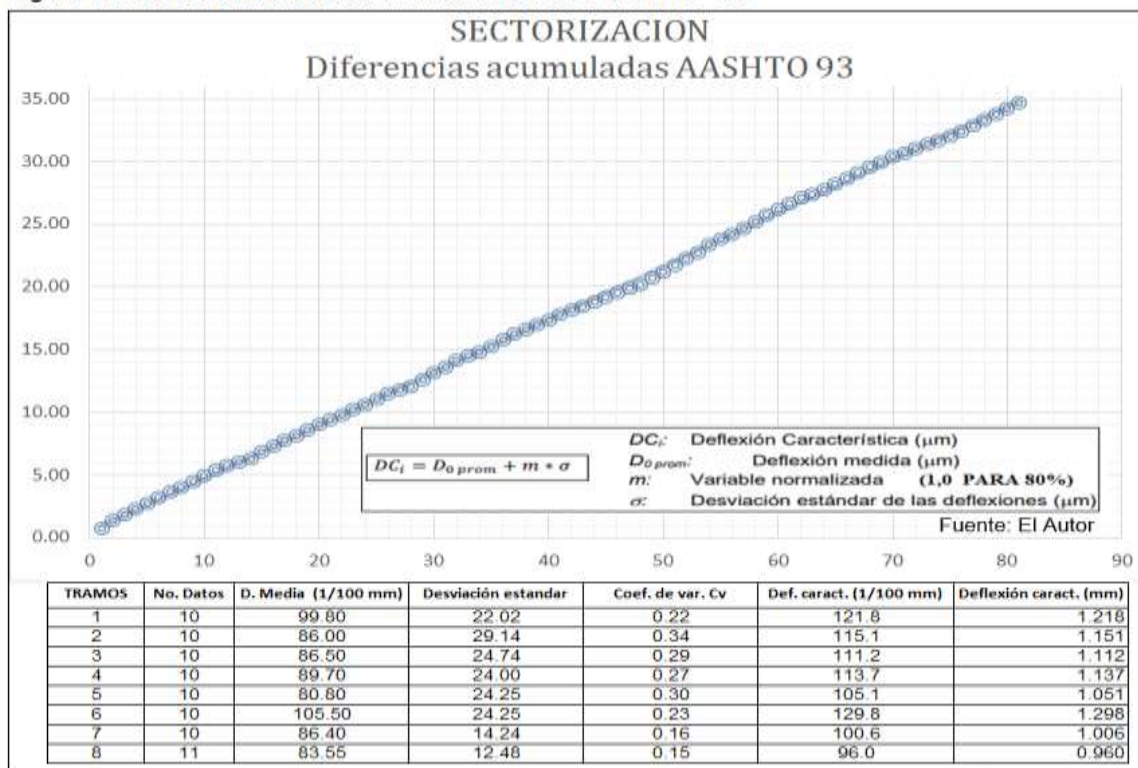
Tabla 13. Sectorización diferencias acumuladas método AASHTO - 93.

 RESULTADOS DE DEFLEXION Y RADIOS DE CURVATURA GRANADA - EL TUNAL (K96+000 a K100+000)										
SECTORIZACIÓN ZX										
MÉTODO DE LAS DIFERENCIAS ACUMULADAS DE AASHTO 93										
ABSCISA	DEFLEXIÓN (1/100 mm)	RC	DEFLEXIÓN (1/1000 mm)	Número de intervalo	Distancia interv. (Km)	Distancia acum. (Km)	Deflexión De promedio	Area intervalo real	Area acumulada	Zx
K96+000	155	60,1	15,5	1,0	0,0500	0,0500	15,5	0,78	0,78	0,75
K96+050	103	61,3	10,3	2,0	0,0500	0,1000	12,9	0,65	1,42	1,37
K96+100	82	76,2	8,2	3,0	0,0500	0,1500	9,3	0,46	1,88	1,81
K96+150	103	61,3	10,3	4,0	0,0500	0,2000	9,3	0,46	2,35	2,25
K96+200	103	50,4	10,3	5,0	0,0500	0,2500	10,3	0,52	2,86	2,75
K96+250	82	76,2	8,2	6,0	0,0500	0,3000	9,3	0,46	3,32	3,19
K96+300	103	61,3	10,3	7,0	0,0500	0,3500	9,3	0,46	3,79	3,63
K96+350	82	76,2	8,2	8,0	0,0500	0,4000	9,3	0,46	4,25	4,07
K96+400	82	76,2	8,2	9,0	0,0500	0,4500	8,2	0,41	4,66	4,45
K96+450	103	61,3	10,3	10,0	0,0500	0,5000	9,3	0,46	5,12	4,89
K96+500	100	62,5	10	11,0	0,0500	0,5500	10,2	0,51	5,63	5,38
K96+550	50	156,3	5	12,0	0,0500	0,6000	7,5	0,38	6,00	5,73
K96+600	80	78,1	8	13,0	0,0500	0,6500	6,5	0,33	6,33	6,03
K96+650	50	156,3	5	14,0	0,0500	0,7000	6,5	0,33	6,65	6,34
K96+700	150	44,6	15	15,0	0,0500	0,7500	10,0	0,50	7,15	6,81
K96+750	70	78,1	7	16,0	0,0500	0,8000	11,0	0,55	7,70	7,34
K96+800	100	62,5	10	17,0	0,0500	0,8500	8,5	0,43	8,13	7,74
K96+850	80	78,1	8	18,0	0,0500	0,9000	9,0	0,45	8,58	8,17
K96+900	100	62,5	10	19,0	0,0500	0,9500	9,0	0,45	9,03	8,60
K96+950	80	78,1	8	20,0	0,0500	1,0000	9,0	0,45	9,48	9,03
K97+000	77	80,1	7,7	21,0	0,0500	1,0500	7,9	0,39	9,87	9,40
K97+050	96	65,1	9,6	22,0	0,0500	1,1000	8,7	0,43	10,30	9,81
K97+100	77	80,1	7,7	23,0	0,0500	1,1500	8,7	0,43	10,74	10,22
K97+150	96	65,1	9,6	24,0	0,0500	1,2000	8,7	0,43	11,17	10,63
K97+200	96	65,1	9,6	25,0	0,0500	1,2500	9,6	0,48	11,65	11,08
K97+250	77	80,1	7,7	26,0	0,0500	1,3000	8,7	0,43	12,08	11,49
K97+300	48	107,8	4,8	27,0	0,0500	1,3500	6,3	0,31	12,39	11,78
K97+350	77	80,1	7,7	28,0	0,0500	1,4000	6,3	0,31	12,71	12,07
K97+400	144	46,6	14,4	29,0	0,0500	1,4500	11,1	0,55	13,26	12,60
K97+450	77	80,1	7,7	30,0	0,0500	1,5000	11,1	0,55	13,81	13,13
K97+500	132	50,4	13,2	31,0	0,0500	1,5500	10,5	0,52	14,33	13,63
K97+550	88	71,0	8,8	32,0	0,0500	1,6000	11,0	0,55	14,88	14,16
K97+600	53	115,7	5,3	33,0	0,0500	1,6500	7,1	0,35	15,24	14,49
K97+650	70	89,3	7	34,0	0,0500	1,7000	6,2	0,31	15,54	14,78
K97+700	132	50,4	13,2	35,0	0,0500	1,7500	10,1	0,51	16,05	15,26
K97+750	88	71,0	8,8	36,0	0,0500	1,8000	11,0	0,55	16,60	15,79
K97+800	88	59,0	8,8	37,0	0,0500	1,8500	8,8	0,44	17,04	16,20
K97+850	88	59,0	8,8	38,0	0,0500	1,9000	8,8	0,44	17,48	16,62
K97+900	70	89,3	7	39,0	0,0500	1,9500	7,9	0,40	17,87	16,99
K97+950	88	71,0	8,8	40,0	0,0500	2,0000	7,9	0,40	18,27	17,37
K98+000	77	80,1	7,7	41,0	0,0500	2,0500	8,3	0,41	18,68	17,76
K98+050	77	80,1	7,7	42,0	0,0500	2,1000	7,7	0,39	19,07	18,12
K98+100	77	107,8	7,7	43,0	0,0500	2,1500	7,7	0,39	19,45	18,48
K98+150	77	107,8	7,7	44,0	0,0500	2,2000	7,7	0,39	19,84	18,84
K98+200	77	107,8	7,7	45,0	0,0500	2,2500	7,7	0,39	20,22	19,21
K98+250	77	80,1	7,7	46,0	0,0500	2,3000	7,7	0,39	20,61	19,57
K98+300	48	107,8	4,8	47,0	0,0500	2,3500	6,3	0,31	20,92	19,86
K98+350	77	80,1	7,7	48,0	0,0500	2,4000	6,3	0,31	21,23	20,15
K98+400	144	46,6	14,4	49,0	0,0500	2,4500	11,1	0,55	21,78	20,68
K98+450	77	80,1	7,7	50,0	0,0500	2,5000	11,1	0,55	22,34	21,21
K98+500	132	50,4	13,2	51,0	0,0500	2,5500	10,5	0,52	22,86	21,71
K98+550	88	71,0	8,8	52,0	0,0500	2,6000	11,0	0,55	23,41	22,24
K98+600	132	50,4	13,2	53,0	0,0500	2,6500	11,0	0,55	23,96	22,76
K98+650	105	60,1	10,5	54,0	0,0500	2,7000	11,9	0,59	24,55	23,33
K98+700	88	71,0	8,8	55,0	0,0500	2,7500	9,7	0,48	25,03	23,79
K98+750	70	89,3	7	56,0	0,0500	2,8000	7,9	0,40	25,43	24,17
K98+800	132	71,0	13,2	57,0	0,0500	2,8500	10,1	0,51	25,93	24,65
K98+850	88	71,0	8,8	58,0	0,0500	2,9000	11,0	0,55	26,48	25,18
K98+900	132	71,0	13,2	59,0	0,0500	2,9500	11,0	0,55	27,03	25,70
K98+950	88	71,0	8,8	60,0	0,0500	3,0000	11,0	0,55	27,58	26,23
K99+000	96	82,2	9,6	61,0	0,0500	3,0500	9,2	0,46	28,04	26,67

RESULTADOS DE DEFLEXION Y RADIOS DE CURVATURA GRANADA - EL TUNAL (K96+000 a K100+000)										
SECTORIZACIÓN ZX										
METODO DE LAS DIFERENCIAS ACUMULADAS DE AASHTO 93										
ABSCISA	DEFLEXIÓN (1/100 mm)	RC	DEFLEXIÓN (1/1000 mm)	Numero de Intervalo	Distancia interv. (Km)	Distancia acum. (Km)	Deflexión Do promedio	Area intervalo real	Area acumulada	Zx
K99+000	96	82,2	9,6	61,0	0,0500	3,0500	9,2	0,46	28,04	26,67
K99+050	77	80,1	7,7	62,0	0,0500	3,1000	8,7	0,43	28,48	27,08
K99+100	67	82,2	6,7	63,0	0,0500	3,1500	7,2	0,36	28,84	27,42
K99+150	77	80,1	7,7	64,0	0,0500	3,2000	7,2	0,36	29,20	27,75
K99+200	96	65,1	9,6	65,0	0,0500	3,2500	8,7	0,43	29,63	28,16
K99+250	96	65,1	9,6	66,0	0,0500	3,3000	9,6	0,48	30,11	28,62
K99+300	115	54,8	11,5	67,0	0,0500	3,3500	10,6	0,53	30,64	29,13
K99+350	77	80,1	7,7	68,0	0,0500	3,4000	9,6	0,48	31,12	29,58
K99+400	86	65,1	8,6	69,0	0,0500	3,4500	8,2	0,41	31,52	29,97
K99+450	77	80,1	7,7	70,0	0,0500	3,5000	8,2	0,41	31,93	30,35
K99+500	58	107,8	5,8	71,0	0,0500	3,5500	6,8	0,34	32,27	30,67
K99+550	77	80,1	7,7	72,0	0,0500	3,6000	6,8	0,34	32,61	30,98
K99+600	77	80,1	7,7	73,0	0,0500	3,6500	7,7	0,39	32,99	31,35
K99+650	77	80,1	7,7	74,0	0,0500	3,7000	7,7	0,39	33,38	31,71
K99+700	77	80,1	7,7	75,0	0,0500	3,7500	7,7	0,39	33,76	32,07
K99+750	77	80,1	7,7	76,0	0,0500	3,8000	7,7	0,39	34,15	32,43
K99+800	96	65,1	9,6	77,0	0,0500	3,8500	8,7	0,43	34,58	32,84
K99+850	96	65,1	9,6	78,0	0,0500	3,9000	9,6	0,48	35,06	33,30
K99+900	96	65,1	9,6	79,0	0,0500	3,9500	9,6	0,48	35,54	33,76
K99+950	96	65,1	9,6	80,0	0,0500	4,0000	9,6	0,48	36,02	34,22
K100+000	92	67,9	9,2	81,0	0,0500	4,0500	9,4	0,47	36,49	34,66

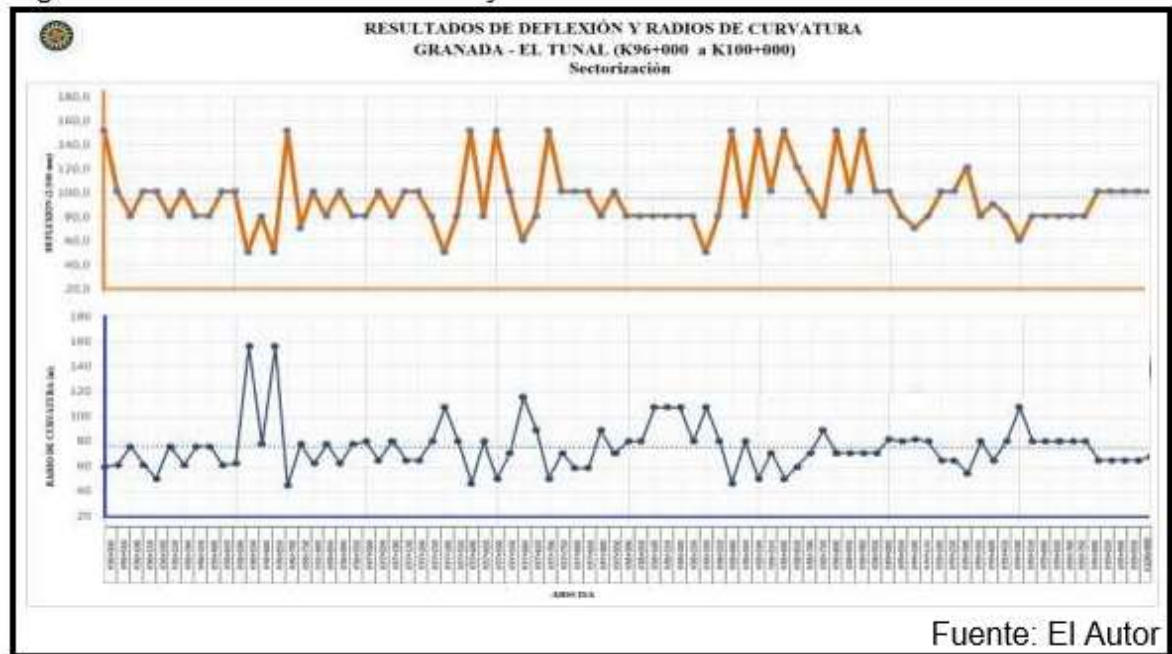
Fuente: EL AUTOR

Figura 45. Gráfico diferencias acumuladas Método AASTHO - 93



El proceso de sectorización por caracterización de las deflexiones de conformidad con el Método de diferencias acumuladas de la AASTHO – 93. La Tabla 13

Figura 46. Gráfico de deflexiones y radios de curvatura.



6.3. MODELACIÓN DEFLECTOMÉTRICA

Teniendo en cuenta que se realizó el examen deflectométrico a través de la Viga Benkelman, se efectuaron modelaciones mediante el programa DEFLEX - IMPACO y Everstress 5.0.

El procesamiento de la información recopilada mediante los ensayos de Viga Benkelman se modeló a través del programa DEFLEX – IMPACO, proveniente de los esquemas de investigación del Instituto Nacional de Vías en la Investigación Nacional de Pavimentos de los años 90. Teniendo en cuenta que se trata de una vía rural terciaria se estableció una confiabilidad del 85%. La figura 47 muestra el portal de entrada de datos.

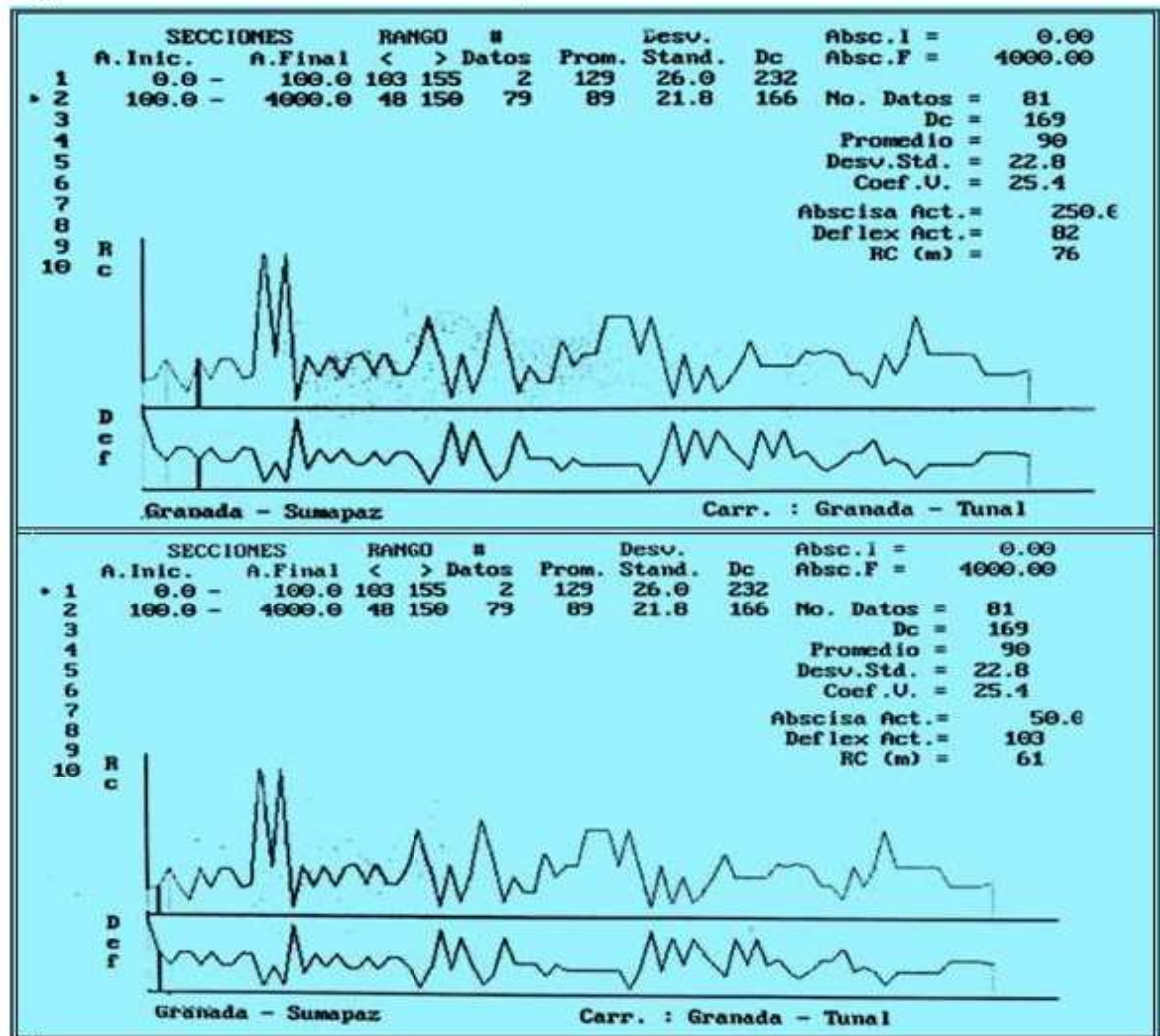
Figura 47. Datos de entrada Programa DEFLEX-IMPACO

Tipo de Datos de Entrada	[LECTURAS]
Constante de la Viga	[4]
Divisiones en el Dial	[10000 pg]
Percentil de la Deflexión Característica	[85%]
Corrección por Temperatura	[SI]
Corrección por Condiciones Climáticas	[SI < 1.5 >]

Fuente: El Autor

A pesar de que la totalidad de la vía tiene un comportamiento homogéneo, las primeras mediciones establecen un sub tramo de 100 m. por lo cual, para el procesamiento de la información se hará en (2) tramos homogéneos, uno al inicio de 100 m del K0+000 a K0+100 y un segundo tramo característico del K0+100 al final K4+000. Cabe resaltar que los coeficientes de variación de los datos procesados por el programa presentan un coeficiente de variación menor al 40%.

Figura 48. Graficas de sectorización, DEFLEX – IMPACO.



Fuente: El Autor

Las figuras 48 y 49 muestran las gráficas y resultados generales que el programa generó con la sectorización de la carretera con los respectivos datos; Numero de lecturas, Deflexión característica, promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, radio de curvatura y demás.

Figura 49. Resultados de modelación sectorización, DEFLEX – IMPACO.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y TRANSPORTE SISTEMA DE GESTION DE LA RED VIAL ANALISIS ESTADISTICO DE LOS DATOS SUMINISTRADOS POR LA 'VIGA BENKELMAN'									
Código : 0000000000 Carretera : Granada - Tunal Sector : Granada - Sumapaz Distrito Nro. : 01 Carril : Derecho									
Abscisa Inicial : 0.00 Abscisa Final : 4000.00 Longitud : 4000.00 mts Espesor de la Carpeta : 18.00 cms Fecha de Evaluación : 12/04/19									
SECCIONES									
#	Long. Sc (mts)	Abscisas Inicial	Abscisas Final	Rango < >		No. Dat.	Defl. Prom.	Desv. Std.	Dc (.01mm)
1	100	0.0	100.0	103	155	2	129	26.0	232
2	3900	100.0	4000.0	48	150	79	89	21.8	166
ANALISIS DEL SECTOR EN SU TOTALIDAD									
	Long. (mts)	Abscisas Inicial	Abscisas Final	Rango < >		No. Dat.	Defl. Prom.	Desv. Std.	Dc (.01mm)
	4000	0.0	4000.0	48	155	81	90	22.8	169

Fuente: El Autor

6.3.1. Cuencos característicos.

Con base en las deflexiones características se seleccionaron los dos cuencos característicos de la siguiente forma:

- Se buscó la deflexión más cercana a la característica
- Con base en lo anterior se toma el respectivo radio de curvatura

SECTOR	Do (1/100)	Rc (m)
1	155	60
2	150	60

6.4. PROCESO DE RETROCÁLCULO DIRECTO

Con el propósito de encontrar los valores correspondientes a los módulos de los materiales que componen la estructura del pavimento estudiado se efectúa un retro cálculo directo tomando como base los datos de la Viga Benkelman y aplicando el siguiente procedimiento:

- Se plantea una estructura tri capa ya que la Viga Benkelman tiene dos sensores por lo cual solamente se pueden calcular dos (2) capas, la tercera se hace por dependencia de los esfuerzos tal como lo establece el modelo del Método Shell de diseño de pavimentos asfálticos.
- Generar dos módulos semilla: Para la subrasante se considera que el módulo resiliente varía entre 5 y 20 veces el CBR (Considerado en Mpa), esto basado en el Instituto del Asfalto. El módulo de la capa granular no tratada se basa en la ecuación:

$$ECG = 0,206(HCG)^{0,45} * Es$$

El módulo del material estabilizado se calcula a través de aproximaciones sucesivas.

- Se realizan las nueve (9) corridas del software - Figura 50, de capa elástica (tres (3) módulos de sub rasante, tres (3) módulos de capa estabilizada RAP para un total de nueve (9) combinaciones). Los resultados se grafican y se obtiene una malla de comportamiento estructural. Tabla No. 14.

Tabla 14. Resultados retro cálculo directo.

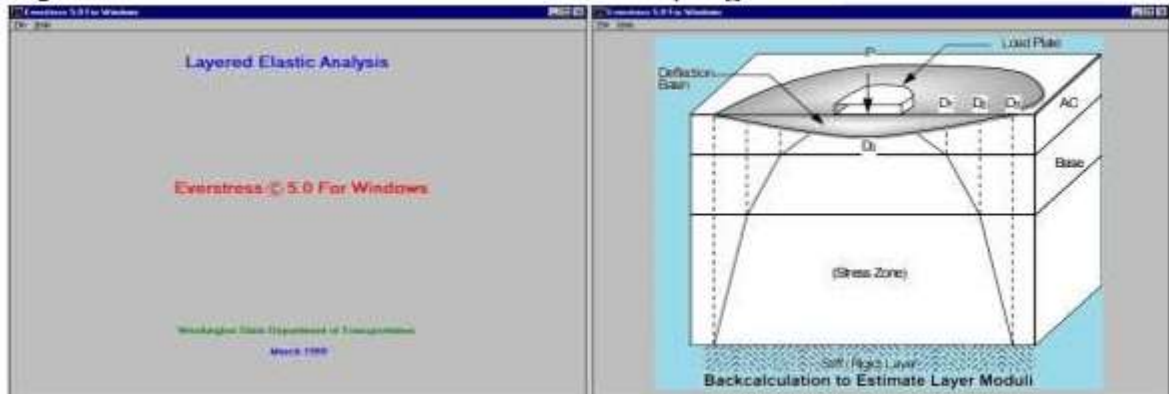
Valores de módulo			D0	D25	RC
E Subrasante	E SBG	E RAP			
25	56	200	166	124	74
		129	179	127	60
		56	205	131	42
40	89	200	112	80	98
		129	121	81	78
		89	129	82	66
55	123	200	66	59	116
		129	93	59	92
		123	94	60	92

Fuente: El Autor

- Se lee en las abscisas la deflexión D_0 y se lee R_c , interceptándolas dentro de la malla construida y así obteniendo los valores de módulo de sub rasante y capa de RAP, la capa del granular de soporte de la capa de RAP, no tratada se estima mediante la ecuación mencionada anteriormente:

$$ECG = 0,206(HCG)*0,45 * E_s$$

Figura 50. Portada de entrada e ilustración programa Everstress 5.0.



Fuente: THE WASHINGTON STATE DOT

6.4.1. Fundamentos del retro cálculo

El retro cálculo está basado en el análisis elástico de las deformaciones generadas por una carga, en este caso del eje trasero de un camión sobre el pavimento, medido mediante los palpadores de los brazos de la Viga Benkelman, Figura 42, las cuales miden los cuencos de deflexión de la carga patrón de medición 8,2 ton. Con los datos obtenidos se insertan dentro del software, con las limitaciones mencionadas anteriormente, es decir con datos limitados por el tipo de elemento de medición y se procesa dicha información. El proceso básicamente se fundamenta en los siguientes parámetros:

- Medición de deflexiones desde el punto de aplicación y la magnitud de la carga, en este caso es la carga patrón 8,2 ton.
- Se determinan los espesores de las capas donde se desarrolla la medición específica.
- Determinación de los módulos semilla, los cuales son los parámetros iniciales con los cuales se da inicio a la modelación computacional se toman desde las deflexiones medidas en superficie. Estos módulos generalmente se estiman a partir de la experiencia del usuario o varias ecuaciones.

- Cálculo de deflexión y exactitud, mediante el modelo elástico en capas como CHEVRON, BISAR o ELSYM5 son generalmente se usa para calcular una cuenca de desviación, posteriormente se determina el nivel de error, a partir de ellos se efectúan el retro cálculo para los módulos de capa que generen la mayor exactitud en la determinación de deflexiones medidas y calculadas, en esquema de modelación se puede ver en la Figura 51.

Figura 51. Esquema general de modelación, Everstress 5.0.

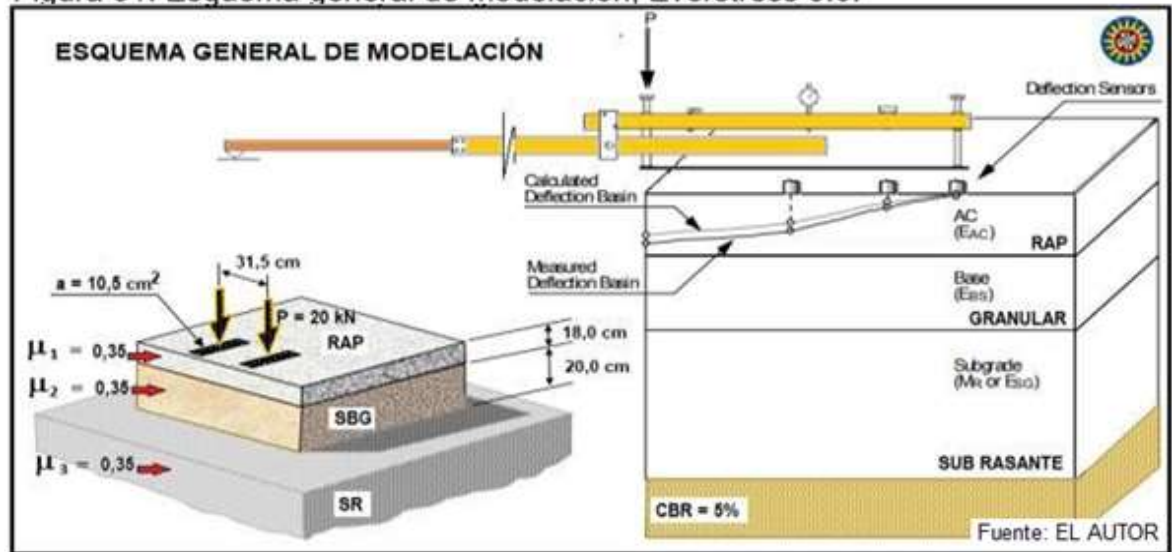
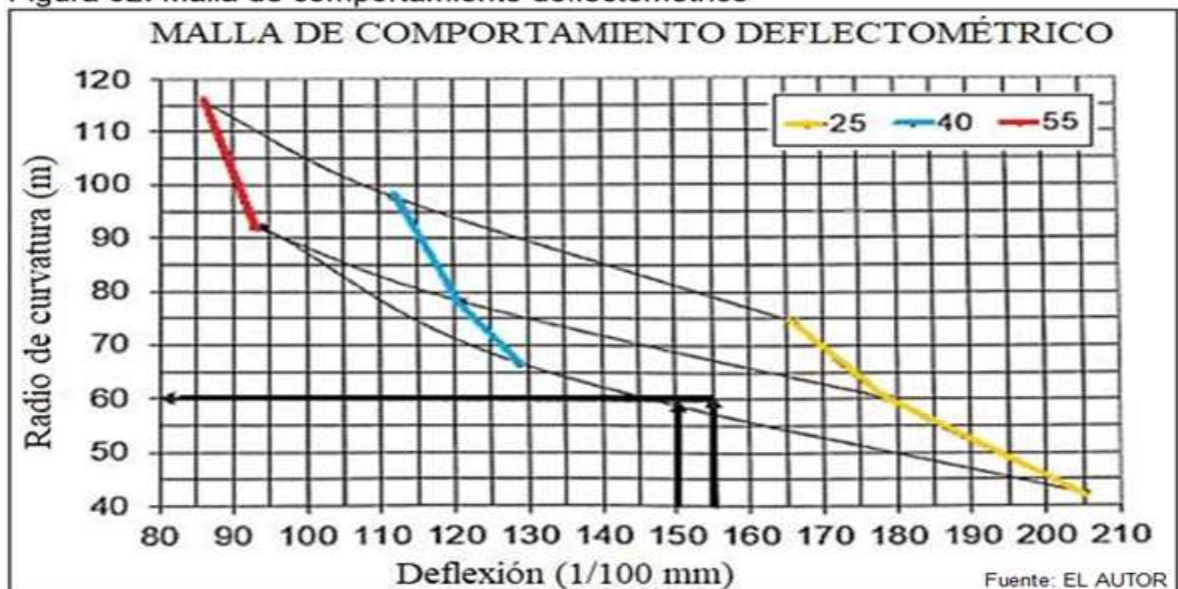


Figura 52. Malla de comportamiento deflectométrico



Este procedimiento está fuertemente ligado a la experiencia del profesional que modela ya que los valores deberán encontrarse dentro de un determinado rango, en nuestro caso, existe cierta incertidumbre respecto del RAP, ya que no existen antecedentes a este respecto, la siguiente es la malla de respuesta, Figura 52.

6.4.2. Módulo de la capa de RAP

Del análisis efectuado se pueden establecer los siguientes valores de módulo de capa:

- E1 (Mpa) = 129 - 129
- E2 (Mpa) = 72 - 63
- E3 (Mpa) = 32 - 28

El módulo de la capa de RAP se debe ajustar por la velocidad de aplicación de carga, lo cual se realiza mediante el uso de los criterios establecidos en la tabla 15.

Tabla 15. Rigidez en función de temperatura y velocidad de aplicación de carga.

Temperatura de las capas asfálticas (°C)	Rigidez relativa de las capas asfálticas	
	5 km/h (viga Benkelman)	80 km/h (FWD)
12.5	3.25	7.40
15.0	2.55	6.35
17.5	1.85	5.30
20.0	1.55	4.42
22.5	1.25	3.55
25.0	1.20	2.89
27.5	1.15	2.23
30.0	1.10	1.85
32.5	1.05	1.48
35.0	1.02	1.31
37.5	1.00	1.15

Fuente: METODO SHELL

Se establece la siguiente relación de módulos dinámicos de capa en función de los valores de rigidez relativa de las capas asfálticas a la velocidad de aplicación de carga y la temperatura de la misma.

$E_a = E_{BC} * (a/b)$, donde:

E_a : Módulo de la capa de RAP

E_{BC} : Módulo dinámico de elasticidad, determinado por retro cálculo.

a : Rigidez relativa de las capas asfálticas, para la velocidad apropiada y temperatura del material asfáltico del lugar. Tabla 7.

b : Rigidez relativa de las capas asfálticas, para la temperatura de ellas en el mismo instante de las medidas de deflexión. Tabla 7.

Por lo anterior, el módulo de la capa estabilizada de RAP, a la velocidad de operación vehicular es (4,42/1,55) el módulo recalculado con los valores de Viga Benkelman, es decir 368 Mpa.

6.5. CÁLCULO DE LA VIDA RESIDUAL DE LA CAPA DE RAP

Para el cálculo de la vida residual de las estructuras de pavimento construido con RAP y sub base, se empleó en Software Win-Depav, en el cual están incluidas las sub rutinas de obtención del número de repeticiones admisibles para las capas de sub rasante y de rodadura. Para este proceso se empleó el método de la Shell, teniendo en cuenta que el retro cálculo se efectuó mediante este mismo método.

6.5.1. Estructura No. 1

Los siguientes son datos de entrada, pantallazo de acceso Win-Depav, Figura 44. muestras el resultado de la modelación.

E_{RAP} (Mpa) = 368; $E_{Subbase}$ (Mpa) = 72; $E_{Subrasante}$ (Mpa) = 32

Figura 53. Modelación estructura 1

WinDepav 2.6 (con DOSBox 0.74) por Luis Ricardo Vázquez Varela, M.Sc.

Archivo DEPAV Acerca de

Descripción del proyecto (no use comas)

Trabajo de grado

Archivo:

Número de capas

2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuecamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión	N esperado	Daño por compresión	N esperado
					k1 k2		k4 k5	
1	5680	0.35	18	P	2.4752E-07 5.0000	1		
2	720	0.35	20	P				
3	320	0.35					6.1500E-07 4.0000	

Carga en la superficie del pavimento

Seleccionar modelo de carga

Radio del área de contacto (cm) 10.50

Distancia entre ruedas (cm) 31.50

Presión de contacto (kgf/cm²) 5.887

IMPORTANTE: Para el correcto funcionamiento de WinDEPAV es necesario que el sistema operativo reconozca el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como separador de listas.

Este programa requiere el software DOSBox para funcionar en sistemas operativos de 64 bits.

Escribe al correo electrónico: ingepav@gmail.com, si requiere algún tipo de asistencia en el uso de WinDEPAV.

Luis Ricardo Vázquez Varela, 2017.

Fuente: Win Depav 2.6.

Figura 54. Resultados estructura 1.

Resultados del análisis

Archivo

Descripción del proyecto Trabajo de grado

Sistema de carga

Radio de las ruedas (cm) 10.50

Distancia entre los centros de las ruedas (cm) 31.50

Presión de contacto de las ruedas (kgf/cm²) 5.887

Posición del valor máximo para una carga

A. Bajo una rueda simple

B. Bajo una de las ruedas de la carga

C. Al centro de la carga

Gráficos de respuesta

Exportar resultados a Excel (.csv)

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuecamiento.

Número de capas: 3

No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Tensión (fatiga)	Factor de daño	Compresión	Factor de daño
						Epilson T (microstrain) N admisible		Epilson Z (microstrain) N admisible	
1	5.680E+03	0.35	0.00	7.801E+00	5.884E+00	892.0		483.0	
	Continua		18.00	-3.283E+00	1.234E+00	-772.0	9.0266E+08 0.000	889.0	
2	7.199E+02	0.35	18.00	-1.173E-01	1.234E+00	-772.0		1750.0	
	Continua		38.00	-4.078E-01	4.793E-01	-642.0		1010.0	
3	3.203E+02	0.35	38.00	-3.549E-02	4.793E-01	-642.0		1530.0	1.1223E+05 0.000

Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm) 124.34

Radio de curvatura (m) 57.13

Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100) 7103.5

Salir y descartar los resultados

Fuente: Win Depav 2.6.

6.5.2. Estructura No. 2

Los siguientes son los datos y resultados del modelo de entrada, Figuras 46 y 47.

E_{RAP} (Mpa) = 368; $E_{Subbase}$ (Mpa) = 63; $E_{Subrasante}$ (Mpa) = 28

Figura 55. Modelación estructura 2.

WinDepav 2.6 (con DOSBox 0.74) por Luis Ricardo Vázquez Varela, M.Sc.

Archivo [X] Depav Acerca de

Descripción del proyecto (no use comas)

Trabajo de grado

Archivo:

Número de capas: 2 3 4 5 6

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y abuelamiento

Capa	E (kgf/cm²)	v	h (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión		
					$C \cdot k_1 \cdot (1/E)^{0.25}$	k2	N esperado	k4	k5	N esperado
1	3680	0.35	18		2.4752E-07	5.0000				
2	630	0.35	20							
3	280	0.35						5.1500E-07	4.0000	1

Carga en la superficie del pavimento

Seleccionar modelo de carga

Radio del área de contacto (cm): 10.50

Distancia entre ruedas (cm): 31.50

Presión de contacto (kgf/cm²): 5.887

IMPORTANTE: Para el correcto funcionamiento de WinDEPAV es necesario que el sistema operativo reconozca el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como separador de listas.

Este programa requiere el software DOSBox para funcionar en sistemas operativos de 64 bits.

Escriba al correo electrónico: ingepav@gmail.com, si requiere algún tipo de asistencia en el uso de WinDEPAV.

Luis Ricardo Vázquez Varela, 2017.

Fuente: Win Depav 2.6.

Figura 56. Resultados estructura 2.

Resultados del análisis											
Archivo											
Descripción del proyecto		Trabajo de grado									
Sistema de carga						Posición del valor máximo para una carga			Gráficos de respuesta		
Radio de las ruedas (cm)		10.50				A. Bajo una rueda simple					
Distancia entre los centros de las ruedas (cm)		31.50				B. Bajo una de las ruedas de la carga					
Presión de contacto de las ruedas (kg/cm²)		5.887				C. Al centro de la carga			Exportar resultados a Excel (csv)		
Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuecamiento.											
Número de capas: 3						Tracción (fatiga)			Compresión		
No.	E (kgf/cm²)	v	Z (cm)	Sigma T (kgf/cm²)	Sigma Z (kgf/cm²)	Epsilon T (microstrain)	N admisible	Factor de daño	Epsilon Z (microstrain)	N admisible	Factor de daño
1	3.660E+03	0.35	0.00	8.076E+00 B	5.884E+00 A	945.0 B			-533.0 C		
	Continua		18.00	-3.651E+00 B	1.162E+00 B	-838.0 C	5.9895E+08	0.000	933.0 B		
2	6.302E+02	0.35	18.00	-1.132E-01 C	1.162E+00 B	-838.0 C			1890.0 B		
	Continua		38.00	-3.855E-01 C	4.619E-01 C	-703.0 C			1110.0 C		
3	2.804E+02	0.35	38.00	-3.324E-02 C	4.619E-01 C	-703.0 C			1690.0 C	7.5393E+04	0.000
Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm)						138.76					
Radio de curvatura (m)						54.66					
Radio de curvatura = Deflexión (m x mm/100)						7584.6					
Salir y descartar los resultados											

Fuente: Win Depav 2.6.

Con los resultados de la modelación se puede concluir que la falla de la estructura del pavimento se esperaría por deficiencia estructural de las capas de materiales granulares, teniendo en cuenta que la repetición admisible por fatiga de la capa de RAP estabilizado es de 598 millones de ejes, mientras que la sub rasante estaría preparada para resistir 75 mil ejes.

7. APLICACIÓN LOCALIDAD DE USME

Con los principios de diseño de mezcla empleados en la Localidad de Sumapaz y las respectivas experiencias de campo registradas, dieron pie para experimentar dentro de un nuevo proceso de construcción en cerca de cinco (5) kilómetros dentro de la red vial local de la Alcaldía de Usme, cabe recalcar que las condiciones de tráfico y los factores climáticos de estas dos zonas guardan ciertas similitudes.

7.1. GESTIÓN INICIAL

Un factor positivo en el inicio del contrato fue la convicción de que efectivamente las actividades preliminares a la instalación del pavimento con RAP eran prioritarios, por tanto, se conformó una consultoría inicial en la cual todos los tramos que fueran intervenidos con reciclaje con la respectiva adecuación de su sistema de drenaje, de tal forma que dentro de los cambios del presupuesto general a monto agotable, se involucraron los estudios y diseño nuevos con las obras de drenaje necesarias para cumplir con una determinada meta física, con forme a lo establecido de manera económica.

Un elemento que resultó ser novedoso y que de alguna forma no pudo ser evitado y que a la postre resultaría generar una innovación dentro del proceso fue que en el proceso de selección de la propuesta ganadora, en contratista debía instalar tramos de lechada asfáltica sobre afirmados. Debido a la coyuntura contractual este fue otro factor de gestión de cambios importante ya que este tipo de tratamientos está concebido para ser utilizado sobre concretos asfálticos y efectivamente en tramos construidos en un contrato anterior, este tratamiento empezó a fallar, de tal forma que esto nos permitió adicionar una variante sobre el reciclaje que no se tenía previsto desde el punto de vista académico.

Figura 57. Actividades preliminares Usme.



Las actividades preliminares tienden a ser más importantes que la propia mezcla ya que se trata del manejo de las aguas superficiales, de infiltración, el control de la geometría y el seguimiento al control de calidad.

7.2. PROCESO DE COSTRUCCIÓN

Una vez aseguradas las condiciones de soporte de las estructuras y las estructuras hidráulicas de drenaje, la superficie de instalación de la mezcla de RAP estaba lista, se debe tener en cuenta que se deben efectuar los ensayos de caracterización del material y los respectivos ensayos de mezcla para conseguir las características de los materiales a aplicar en el proceso.

7.2.1. Mezcla con RAP

Se destinó un patio central de mezclado a donde llegó el material de RAP, material granular de adición, emulsión asfáltica, cemento hidráulico y agua se dosificaron las cantidades de adición de cada uno de ellos y se inició la producción de la mezcla en frío.

Figura 58. Proceso de mezcla en patio.



Se efectúa, con la fórmula de trabajo obtenida, un tramo de prueba de 150 m de longitud siguiendo la secuencia que se tuvo en cuenta en el contrato inmediatamente anterior, se realizaron los ajustes de la fórmula de trabajo y dio inicio a la aplicación del proceso, con el siguiente diseño para el tramo Soches:

Figura 59. Espesores de diseño Localidad de Usme.

	ALCALDÍA LOCAL DE USME		
	Contrato: FDLU 290-2018		
Objeto: REALIZAR LAS ACTIVIDADES A MONTO AGOTABLE PARA LA CONSERVACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE LA MALLA VIAL RURAL LOCAL DE USME DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.			
ESTRUCTURA RECOMENDADA A PARTIR DEL DISEÑO DE ESPESORES DE BASE ESTABILIZADA - PLACA HUELLA - AFIRMADOS			
CORREGIMIENTO:	SOCHES	CIV:	5009889
ESPESORES FINALES DE CONSTRUCCIÓN			
Hicropavimento 		Suelto	Compacto
CAPA 1 RAP + 15% B600 + 90 Lt/m ³ Emulsión + 45 Kg/m ³ Cemento		0,075	0,06
CAPA 2 RAP + 15% B600 + 90 Lt/m ³ Emulsión + 45 Kg/m ³ Cemento		0,075	0,06
SUBBASE GRANULAR		0,23	0,20
Sobrasante			
Fuente: EL AUTOR			

7.2.2. Extendido, conformación y compactación

Se traslada el material mezclado, se acordona, conforma y compacta en dos capas de acuerdo a lo establecido en la fórmula de trabajo, Figura 60.

Figura 60. Extendido, conformación y compactación.



Los procesos de elaboración de la mezcla en las vías de Usme se realizaron en el año 2019 y como se observa, siguen un patrón similar a los realizados 2 años atrás.

7.2.3. Proceso de curado

A pesar de que se siguió el mismo esquema de trabajo de la malla vial de Sumapaz, en este caso el proceso de curado cambió, la mezcla se comportó de una manera diferente ya que el tiempo de curado se aceleró y a los dos días la capa alcanzó una importante rigidez. Para llegar a este mismo aspecto de esta mezcla tuvieron que pasar cerca de dos semanas.

Se evaluaron los cambios que se pudieran presentar y se pudo constatar que el cemento influyó de manera importante en el proceso de curado ya que en este caso el cemento empleado fue comprado de una marca que se produce fuera del país. En este sentido es importante, a futuro, hacer un examen de esta

circunstancia. El registro fotográfico de la Figura 61 deja ver las etapas del proceso de curado.

Figura 61. Curado y compactación.



El curado resulta ser un factor fundamental en la calidad del producto final, se observa el ciclo desde la conformación inicial hasta pasado 1 mes del proceso.

7.2.4. Lechada asfáltica

Una vez terminado el proceso de curado y teniendo en cuenta que dentro del contrato se tenía prevista la instalación de una lechada asfáltica a continuación se muestra el aspecto de las vías finalmente entregadas a la comunidad. Figura 62.

Figura 62. Pavimento de RAP con lechada asfáltica.



La aplicación del micro-pavimento da un acabado más homogéneo de la mezcla, para ello es necesario que el curado del RAP sea completo.

8. ESPECIFICACION PARTICULAR RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRIO EMPLEANDO LIGANTES ASFÁLTICOS E HIDRÁULICOS

En este numeral se formulará una nueva norma asociada al uso de materiales reciclados proveniente de pavimentos disgregados en lugares diferentes al sitio de desarrollo de la obra. Si bien es cierto existe, dentro de la normativa **nacional** el artículo 461-07 de las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías de Colombia, que establece el procedimiento para el tratamiento de reciclajes para pavimentos asfálticos disgregados en el mismo sitio de la obra, así como la norma IDU 450-11, no es así para el caso que nos ocupa, ya que los factores y tratamientos tienen unas importantes consideraciones en su tratamiento.

a partir de las experiencias mostradas en este informe dentro de los contratos de mantenimiento y rehabilitación de vías secundarias en las Localidades de Sumapaz y Usme y con el empleo de los criterios normalizados de INVIAS e IDU a continuación se establecerá una norma particular, a ser utilizada en vías de tránsito tipo NT1 en las que el reciclaje utilizado tiene un origen desconocido.

8.2. MEZCLA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO, TRASPORTADO, ESTABILIZADA CON EMULSIÓN ASFALÁTICA Y CEMENTO PORTLAND EN SITIOS DISTINTOS AL DE SU DISGREGACIÓN.

8.2.1. Descripción

Este trabajo consiste en la obtención, transporte, mezcla, colocación y compactación de una o más capas de material de reciclaje obtenido a partir de la demolición de carpetas asfálticas deterioradas, obtenidas mediante máquinas recicladoras en sitios diferentes a su disgregación, las cuales serán adicionadas con materiales granulares, ligantes asfálticos e hidráulicos para ser empleadas en vías con nivel de tránsito NT1, en concordancia con los alineamientos, cotas, secciones y espesores indicados en los planos y determinados por el interventor.

De conformidad con la capa estructural dentro de la cual serán involucradas podrán ser clasificadas conforme a lo establecido dentro de la tabla 8.

Tabla 16. Denominación de las capas asfálticas construidas con reciclaje.

TIPO	DESCRIPCIÓN
Rodadura	Capa superior
Intermedia	Capa subyacente a la rodadura, instalada en una o más capas
Base	Instalada inmediatamente bajo la capa intermedia en una o más capas

Fuente: EL AUTOR

8.2.2. Materiales

8.2.2.1. Material de reciclaje

Los agregados pétreos serán los resultantes de la pulverización mecánica de las capas de pavimentos, procedentes de patios de acopio o de plantas de trituración, deberán ser encajadas, en caso de ser necesario, con agregados provenientes de la explotación de canteras hasta alcanzar la franja granulométrica que se muestra en la Tabla 9.

Tabla 17. Franja granulométrica de agregados producto de reciclaje y encaje.

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA
NORMAL	ALTERNO	
37,5 mm	1 ½"	100
25,0 mm	1"	75 - 100
19,0 mm	¾"	65 - 100
9,5 mm	3/8"	45 - 75
4,75 mm	No. 4	30 - 60
2,00 mm	No. 10	20 - 45
425 m	No. 40	10 - 30
75 m	No. 200	5 - 20

Fuente: EL AUTOR

Los agregados adicionales deberán cumplir con los parámetros de calidad establecidos en la Tabla 400 1, del Artículo 400 y en la tabla 300.1 del Artículo 300 de las Especificaciones Generales de Construcción, cuando haya duda entre

límites exigidos por las dos tablas, primarán los valores indicados en la Tabla 400 – 1.

Es recomendable que el agregado de adición tenga características mineralógicas similares al del agregado que se recicla, con el fin de evitar que el ligante tenga diferente adhesividad con cada uno de los componentes.

El producto del porcentaje que pasa por el tamiz de 75 μ m (No. 200) del agregado combinado por su índice de plasticidad, no podrá ser mayor de setenta y dos (72).

8.2.2.2. Materiales bituminosos

Para los reciclados en frío en el lugar o en patio de mezclado, con emulsión asfáltica, ésta será de rompimiento lento, del tipo CRL-1, cuyo residuo de destilación tenga una penetración entre cien y doscientas cincuenta (100–250) décimas de milímetro, que sea compatible con los agregados pétreos, la cual deberá cumplir con los requisitos de calidad establecidos en el numeral 400.2.4 del Artículo 400 de las presentes especificaciones. Si se requiere una emulsión de diferentes características, de efecto degenerante, por ejemplo, ella deberá ser objeto de una especificación particular. Se deberá comprobar, además, la compatibilidad de la emulsión asfáltica con el material fresado mediante el ensayo de envuelta y resistencia al desplazamiento sin adición de carbonato de calcio, según la norma de ensayo INV E-769.

8.2.2.3. Puzolanas

Se consideran como tales, algunas llenantes comerciales que complementan la acción del ligante asfáltico en cuanto a su reactividad. Los más utilizados son el cemento Portland, la cal hidratada y las cenizas volantes, cuyas características se deberán establecer en una especificación particular.

Si las llenantes son adicionadas con el propósito de controlar la rotura de la emulsión asfáltica, no se considerarán como puzolanas y, en consecuencia, no habrá pago separado por su suministro.

8.2.2.4. Agua

El agua empleada en los procedimientos de trabajo cumple doble función, un agua requerida para el humedecimiento previo de los agregados pétreos y un agua adicionada en el proceso de mezcla como factor de manejabilidad de la mezcla, en ambos casos, estará libre de materia orgánica y de elementos

químicos que dificulten el proceso de mezclado y el curado de la mezcla. Su pH, medido según la norma ASTM D-1293, deberá estar entre cinco y medio y ocho (5.5-8.0)

8.2.3. Equipo

En adición a lo que establece el numeral 400.3 del Artículo 400, el equipo para los trabajos aquí especificados deberá contar con elementos para la explotación, cargues, transportes, trituración, lavado cuando se requiera, y clasificación de los eventuales agregados pétreos de adición para la corrección granulométrica; para la extracción de agua; para el almacenamiento, transporte y distribución del agua y del ligante asfáltico; para la disgregación del pavimento existente y para la mezcla adecuada de todos los ingredientes; así como para la compactación y conformación de la capa reciclada, el uso de equipos y materiales estará fuertemente relacionado con los tramos experimentales previos a la ejecución final de las obras

Teniendo en cuenta que el proceso de mezcla puede realizarse en patio o en vía, existen dos equipos mínimos de trabajo así:

1. En patio: Un sitio especialmente adecuado para realizar la actividad de mezcla, en explanación y área, donde las máquinas puedan tener la posibilidad de maniobrar y efectuar el proceso en forma adecuada, Maquina para homogenizar la mezcla tipo motoniveladora, retrocargador, camión irrigador de agua, irrigador de emulsión, camiones para el transporte.
2. En vía: Superficie granular lista, desde el punto de vista mecánico y geométrico, Maquina para homogenizar la mezcla, podría ser recicladora, motoniveladora o similar, camión irrigador de agua, irrigador de emulsión y máquinas de compactación.

8.2.4. Ejecución de los trabajos

8.2.4.1. Explotación de Materiales y elaboración de agregados

Los materiales provenientes de los patios de acopio deberán ser caracterizados y sus condiciones deberán ser comparadas con lo establecido en el numeral

8.1.2.1. dl presente documento y las condiciones establecidas en los artículos asociados a este.

8.2.4.2. Estudio de los materiales por reciclar

Los materiales reciclados deberán ser muestreados de tal forma que se extraída de las pilas una muestra representativa con forme a lo establecido en lo establecido en la Norma I.N.V. e – 201 – 07, Muestreo de materiales para construcción de carreteras, a fin de tomar fracciones representativas de los acopios. Sobre las muestras del material determinará la granulometría, de acuerdo con la norma de ensayo INV E-213. Para lo cual, dada la deficiencia de tamaños dentro de las gradaciones medias deberá ser encajada, consiguiendo así un porcentaje óptimo de adición.

Se considerará que no hay homogeneidad en las muestras procesadas cuando los resultados de los ensayos individuales de granulometría presenten, respecto del promedio de los valores encontrados, variaciones superiores a las tolerancias establecidas en la Tabla 10, o cuando se detecte una variación manifiesta en el tipo de agregados.

Tabla 18. Franja granulométrica de agregados producto de reciclaje.

CARACTERÍSTICAS		TOLERANCIA
Granulometría (tolerancia respecto de la masa total del material por reciclar)	Porcentaje que pasa tamiz de 2 mm y mayores (No 10 y mayores)	± 6
	Porcentaje que pasa tamiz de 425 µm (No 40)	± 4
	Porcentaje que pasa tamiz de 75 µm	± 3
Espesor (variación en el espesor de la capa, en mm)	Capas asfálticas	25
	Capas granulares	50

Fuente: EL AUTOR

8.2.4.3. Diseño de mezcla y obtención de la fórmula de trabajo

Al respecto, rige todo lo que sea pertinente del numeral 400.4.2 del Artículo 400.

El Constructor estimará la cantidad óptima teórica necesaria de ligante residual para la combinación de agregados provenientes de las pilas de reciclaje, sea en patio o en vía y determinará el tipo y porcentaje de emulsión asfáltica y de adición puzolana de modo de producir una mezcla cuya calidad sea comparable a una base estabilizada con emulsión asfáltica elaborada con agregados pétreos y ligante asfáltico nuevos.

Previamente a la definición del contenido de ligante, el Constructor establecerá la necesidad de incorporar agregados pétreos nuevos en la mezcla para corregir deficiencias granulométricas e indicará la proporción en que ellos deban intervenir. El Constructor también definirá la necesidad de pre humedecer el material preparado para la mezcla y determinará las humedades más apropiadas de mezcla y compactación. La humedad de compactación se determinará mediante el ensayo modificado de compactación (norma de ensayo INV E-142) sobre el material por reciclar. La humedad óptima de compactación será, salvo instrucción en contrario del Interventor, la correspondiente a la óptima del ensayo menos un cinco por mil (0.5%) y menos el porcentaje de emulsión o cemento asfáltico espumado a incorporar en la mezcla. Esta humedad se ajustará, si fuese necesario, durante la fase de experimentación. Estas pruebas se deberán complementar con ensayos mecánicos adecuados para el diseño de la mezcla.

Para este tipo de diseño se empleará el ensayo de inmersión-compresión (anexo de la norma INV E-738), aplicándose los siguientes criterios como guías para la selección del contenido óptimo de ligante en la mezcla reciclada:

- Resistencia de probetas curadas en seco $\geq 20 \text{ kg/cm}^2$
- Resistencia conservada tras curado húmedo $\geq 75\%$

El porcentaje óptimo de ligante residual será aquel que, cumpliendo las exigencias indicadas, permita alcanzar el valor máximo de resistencia tras curado húmedo.

Se pueden utilizar otros procedimientos para el diseño de las mezclas. En tal caso, los métodos de diseño y los criterios de selección del porcentaje óptimo de ligante se deberán definir en una especificación particular.

El informe de diseño que presente el Constructor, en el cual propondrá la fórmula de trabajo por aplicar en cada tramo homogéneo, para consideración y eventual aprobación del Interventor, contendrá, cuando menos, la siguiente información:

La identificación y la proporción (en masa seca) de cada fracción del material granular, si se requieren agregados de adición.

- La granulometría de cada fracción del material granular y la granulometría combinada, si se requieren agregados de adición.
- El porcentaje de agua para mezcla y para compactación, en relación con el peso seco del componente mineral.

- El porcentaje óptimo de ligante residual y de emulsión, en relación con la masa seca del material reciclado y el componente mineral adicional si se requiere.
- La identificación y dosificación de puzolanas y de aditivos, si se requieren, los cuales deben ser de la misma marca utilizada en las pruebas de laboratorio y en la fase de experimentación.
- Las resistencias obtenidas a la compresión en la prueba de inmersión-compresión.
- La masa unitaria seca máxima y la humedad óptima correspondientes a la dosificación de diseño.
- Los resultados de los ensayos complementarios que indique el Pliego de Condiciones

La fórmula de trabajo establecida en el laboratorio se podrá ajustar con los resultados de las pruebas realizadas durante la fase de experimentación. Igualmente, si durante la ejecución de las obras varía la procedencia de alguno de los componentes de la mezcla, se requerirá el estudio de una nueva fórmula de trabajo.

Los trabajos no se podrán iniciar a escala industrial, si la fórmula de trabajo definitiva para cada tramo no ha sido aprobada por el Interventor.

La aprobación de la fórmula de trabajo por parte del Interventor, no exime al Constructor de su plena responsabilidad de alcanzar, con base en ella, la calidad exigida en este Artículo.

9. ASPECTOS ECONÓMICOS

En los capítulos anteriores se muestra como un material de desecho puede llegar a ser una solución viable no solo para intervenir vías de tercer orden sino también de garantizar una mayor estabilidad en el tiempo. Los beneficios de un adecuado tratamiento de los materiales reciclados se extienden al ámbito ambiental al aporte para la mitigación de los efectos adversos que sobre el medio natural tiene la explotación de minerales, de una u otra forma al transformar estos factores en beneficios económicos resulta ser más ventajoso que cualquier tecnología para este tipo de vías.

9.1. BENEFICIOS

En la siguiente matriz se resumen los beneficios ambientales, sociales, técnicos y económicos del uso de RAP para intervenir vías rurales de bajo volumen de tránsito, respecto de los tratamientos similares para este tipo de vías.

Tabla 19 Análisis de beneficios tecnología del RAP

ANÁLISIS DE BENEFICIOS DE LA TECNOLOGÍA CON RAP				
CRITERIO DE COMPARACIÓN		PAVIMENTOS CONVENCIONALES	AFIRMADOS	PAVIMENTO CON RAP
AMBIENTALES	Explotación de canteras a cielo abierto	Para su construcción es necesario intervenir las canteras cercanas al proyecto y explotar la totalidad de los materiales granulares a utilizar.	Para su construcción es necesario intervenir las canteras cercanas al proyecto y explotar la totalidad de los materiales granulares a utilizar.	Se hace necesario explotar solo una fracción de materiales granulares, el volumen de los mismos depende de los tipos de diseño y sus aplicaciones
	Trasporte de materiales	Es necesario efectuar el traslado de los materiales a la planta de trituración si esta no se encuentra en la misma cantera y posteriormente a la obra.	Es necesario efectuar el traslado de los materiales a la planta de trituración si esta no se encuentra en la misma cantera y posteriormente a la obra.	Puede darse el caso que no se requiera transporte cuando el reciclaje se hace en sitio, en caso contrario se traslada desde el patio de almacenamiento a la obra.

	Manufactura de los agregados	Los materiales granulares provenientes de las canteras de explotación, deben ser procesados para alcanzar los tamaños determinados por su aplicación y posteriormente separados por tamaños y luego nuevamente mezclados. Igualmente para la elaboración de los concreto asfálticos se tiene un proceso particular.	Los materiales granulares provenientes de las canteras de explotación, deben ser procesados para alcanzar los tamaños determinados por su aplicación y posteriormente separados por tamaños y luego nuevamente mezclados.	Los materiales requieren, en el caso más extremo, separación de los tamaños y elaboración de una mezcla, sin embargo, cuando el reciclaje es uniforme no necesita tratamiento alguno.
	Manufactura de las mezclas en frío	Para la elaboración de las mezclas en frío requieren de instalación, aplicación de los aditivos, mezcla y compactación.	No aplica	Para la elaboración de las mezclas en frío requieren de instalación, aplicación de los aditivos, mezcla y compactación.
	Manufactura de las mezclas en caliente	Es necesario que se involucre la totalidad de cemento asfáltico y los materiales granulares dentro de la planta de producción.	No aplica	En las mezclas asfálticas en caliente, el uso de RAP, disminuye hasta en un 30% la adición de materiales bituminosos y granulares.
SOCIALES	Sobre la salud de la comunidad	El procesamiento establece la totalidad de los insumos para el aprovechamiento de agregados y bitúmenes por lo que el impacto de partículas en el aire y gases es total. Reduce en forma importante la emanación de polvo al medio ambiente y a las corrientes de agua.	El procesamiento establece la totalidad de los insumos para el aprovechamiento de agregados, el impacto se traslada de la cantera a la vía ya que los materiales quedan expuestos a la intemperie, llegando al aire y a las aguas de las corrientes cercanas.	El procesamiento no establece la totalidad de los insumos para el aprovechamiento de agregados y bitúmenes, las emanaciones se pueden reducir hasta en un 50%, dependiendo del tipo de proceso. Reduce en forma importante la emanación de polvo al medio ambiente y a las corrientes de agua.

ECONÓMICOS	Costos de transporte	Desde el enfoque de la construcción, la aplicación de costos de producción de agregados y mezclas es total. Desde el enfoque de los usuarios mitiga costos operacionales por varios años.	Desde el enfoque de la construcción, la aplicación de costos de producción de agregados es total. Desde el enfoque de los usuarios mitiga costos operacionales por algunos meses.	Desde el enfoque de la construcción, la aplicación de costos de producción de agregados y mezclas tiene ahorros. Desde el enfoque de los usuarios mitiga costos operacionales por varios años.
	Impacto regional	Los costos de producción de la región disminuyen al mejorar la velocidad de circulación vehicular y trasladar dicho beneficio a la mayor productividad, este hecho se garantiza por varios años.	Los costos de producción de la región disminuyen al mejorar la velocidad de circulación vehicular y trasladar dicho beneficio a la mayor productividad, este hecho se garantiza por algunos meses.	Los costos de producción de la región disminuyen al mejorar la velocidad de circulación vehicular y trasladar dicho beneficio a la mayor productividad, este hecho se garantiza por algunos años.
	Impacto general	La condición de las vías y la productividad se traslada a un mayor aporte al PIB sectorial y mayores condiciones de vida de la comunidad.	Por la naturaleza y duración de la intervención con este material, es muy difícil conseguir un impacto real sobre el PIB sectorial.	La condición de las vías y la productividad se traslada a un mayor aporte al PIB sectorial y mayores condiciones de vida de la comunidad.
TÉCNICOS	Tipos de tratamiento	Estos tratamientos requieren una mayor inversión e involucran procesos y materiales que deben poseer cualidades técnicas definidas y una estabilidad tal que mínimo su condición permanezca estable por cinco (5) años.	Este tipo de tratamiento es paliativo, su duración es efímera y esta condición depende del grado del clima, tipo de tráfico y condición de la sub rasante, las intervenciones generan una superficie de tránsito adecuada desde 1 mes hasta 8 cuando los factores mencionados favorecen este hecho.	Estos tratamientos requieren una mayor inversión e involucran procesos y materiales que deben poseer cualidades técnicas definidas y una estabilidad tal que mínimo su condición permanezca estable por cinco (5) años.
	Duración de las intervenciones	5 o más años	1 a 8 meses	3 a más años

Fuente: El Autor

9.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para el análisis económico se estimarán los costos en los que se incurriría teniendo en cuenta las alternativas que para este tipo de carreteras se puedan tener, se trata de vías de tercer orden de bajos niveles de tránsito.

9.2.1. Parámetros generales de análisis

Los siguientes son los elementos comunes, especificaciones, criterios en cuanto a costos procesos y demás elementos que afectan el precio.

Longitud de análisis:	1000 m (1Km)
Dimensión de comparación:	1,0 m3
Ancho promedio de calzada:	5,0 m
Condiciones de drenaje:	Buenas y no se incluyen en los precios
Tipos de revestimientos:	Afirmado, Asfalto, Rap y placa huella.
Tipo de maquinaria:	Motoniveladora, vibro-compactador Mezcladora de concreto. Irrigadores
Distancia a la cantera de agregados:	cien (100) Kilómetros
Distancia planta de concreto:	ciento veinte (120) Kilómetros
Distancia planta de concreto:	ciento veinte (120) Kilómetros
Distancia acopio RAP:	ciento cincuenta (150) Kilómetros
Obras geotécnicas e hidráulicas (%):	35%

La cantera más próxima medida desde el centro de gravedad del proyecto para granulares es de 100 km, esto se debe a que es una zona de protección ambiental no existen canteras autorizadas en los alrededores. La distancia de acarreo del RAP desde los patios de acopio es de 150 km. La distancia a las plantas de concreto asfáltico y concreto hidráulico se encuentran en los barrios de sur de Bogotá a una distancia media de 120 Km.

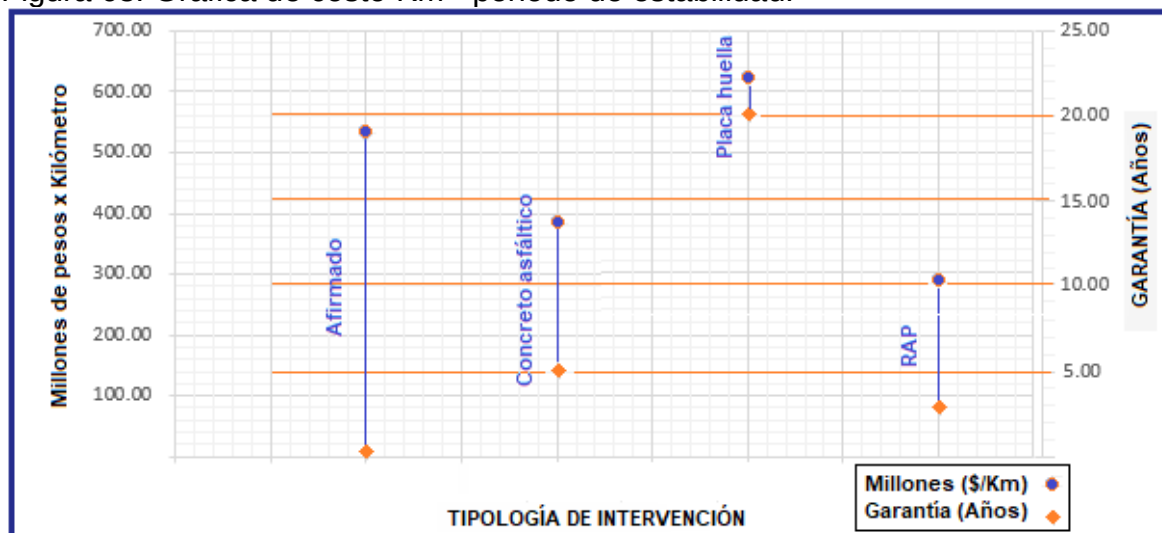
Tabla 20 Matriz de comparación y costo por kilómetro de vía

Items	Unidad	Afirmado	Concreto asfáltico	Placa huella	RAP
Tramo de comparación	Km	1.00	1.00	1.00	1.00
Distancia de acarreo	Km	100.00	120.00	120.00	150.00
Precio m3/km	\$	950.00	1,200.00	1,200.00	950.00
Periodo de diseño	Años	0.30	5.00	20.00	3.00
Factor de expansión	%	0.24	0.22	1.00	0.24
Ancho de calzada	m	5.00	5.00	5.00	5.00
Espesor de capa	m	0.15	0.10	0.15	0.15
Precio del material	\$/m3	25,000.00	450,000.00	620,000.00	105,000.00
Volumen de material	m3	930.00	610.00	750.00	930.00
Precio instalación	\$/m3	25,000.00	110,000.00	120,000.00	65,000.00
Precio transporte	\$/m3	93,000.00	73,200.00	90,000.00	139,500.00
Total pavimento	\$/m3	143,000.00	633,200.00	830,000.00	309,500.00
Obras anexas (millones)	\$/km	200.00	200.00	200.00	200.00
Total (millones de pesos)/Km	\$/km	531.96	386.25	622.50	287.84

Fuente: El Autor

La siguiente es la gráfica resumen donde se observa el costo Km de por tipología de revestimiento de la vía y el periodo de garantía de cada una de ellas con lo cual se puede establecer la eficiencia económica de las posibles alternativas.

Figura 63. Grafica de costo Km - periodo de estabilidad.



Fuente: El Autor

Esta gráfica establece la situación económica que se podría dar para una inversión específica dentro de un proyecto con características similares a la estudiada:

Un mantenimiento anual con afirmado requiere para el primer año 732 millones de pesos incluyendo la media de obras complementarias, del segundo año en adelante 532 millones teniendo en cuenta que en el primer año se han pagado las obras de drenaje y estabilización. Para el concreto asfáltico 586,2 millones dividiendo las mismas obras asociadas en cinco años, para la placa huella 822,5 difiriendo las obras a 20 años y para el RAP 487,8 millones por kilómetro difiriendo obras complementarias en 3 años, si se continua el proceso de reciclaje, el costo anual sería inferior a los 288 millones, en especial si se reutiliza el material del sitio.

Esto indicaría que la peor decisión que la Administración tomará para mantener una vía terciaria sería instalar afirmado cada 3 meses para mantener la regularidad superficial y el nivel de servicio de la red vial, seguido por el concreto asfáltico y luego el RAP. La mejor decisión es la placa huella, sin embargo, este tipo de pavimento solo es posible para ciertas intervenciones viales que obedecen a criterios de pendiente, no obstante, desde el punto de vista de inversión pública en la situación analizada sería la mejor.

En lo que respecta a otros tipos de intervención, como es el caso de suelo cemento, de bases estabilizadas con emulsión o la combinación de ellas, es necesario que se empleen agregados nuevos lo cual ubicaría esta condición entre el afirmado y el concreto asfáltico. De otro lado, una ventaja económica importante es que el RAP es un tipo de disposición de desechos y no tiene costo alguno más que su transporte.

La escasez de los recursos públicos y la necesidad de distribuir de manera equitativa estas inversiones hacen inviable cuantiosas inversiones en vías terciarias y concentración de recursos en determinadas zonas rurales, es por ello que carreteras en concreto asfáltico o hidráulico es inviable desde punto de vista macroeconómico, por lo que la gran mayoría de intervenciones se hacen con materiales regionales de afirmado.

A pesar de que el uso de RAP involucra la aplicación de una cantidad no despreciable de recursos, su uso no deja de ser una alternativa racional ya que al involucrar los procesos establecidos para un adecuado tratamiento del material su vida útil podría superar los 4 años con lo cual el aporte al desarrollo económico de las zonas rurales cercanas a las ciudades principales potenciaría un mayor aporte a la evolución del PIB agregado y a las condiciones de productividad y desarrollo de estas zonas con menores costos de inversión.

9.2.2. Análisis técnico de acuerdo a las estructuras comparadas

En resumen veamos a continuación una tabla donde se esgrimen los parámetros técnico en cuando ensayos, tipo de alternativa y parámetros de diseño, para una zona localizada al sur de la Sabana de Bogotá, dentro de los cerros que comprenden el Páramo de Sumapaz, con temperaturas entre 3 y 12°C, precipitaciones entre 1000 y 2000 mm año y cargas de transito tipo NT1, especialmente.

Se debe precisar que los espesores de la capa de material granular existente es común para las alternativas evaluadas, la tipología de sub rasante y la capa de material granular de soporte. Igualmente se espera que las obras de drenaje tengan un tratamiento similar en todos los casos y la única variante es el espesor del tratamiento o revestimiento de la calzada.

De conformidad con el diseño de pavimentos la siguiente es la tabla para la determinación del tránsito de diseño:

Tabla 21 Tabla de resultados de conteos de tránsito

DETERMINACIÓN DE TOTAL DE TRÁNSITO POR VEHÍCULOS COMERCIALES AL AÑO						
No. Días		Factor trán.	Total			
Días al año	365					
Ordinario	269	1,00	269			
Domingo	48	0,50	24			
Sabado	48	0,30	14			
Suma anual de servicio de la vía			307			
Tipo de vehiculo	No. Semanal	No. Diario	Días al año	Cantidad	Factor noche	Total
Buseta	0,5	0,07	307	22	1,1	24
Bus	0,25	0,04	307	11	1,1	12
Camion C2-P	2	0,29	307	88	1,1	96
Camión C2-G	2	0,29	307	88	1,1	96
Camion C3	1	0,14	307	44	1,1	48

Fuente: El Autor

Para la determinación del número ejes equivalentes se consideró el flujo vehicular con una intensidad de 90% en el horario de 6:00 am a 6:00 pm, así como, en el flujo se considera que el día Sábado el flujo es 50%, el domingo de 30% y lunes a viernes 100%. factor direccional el 100% teniendo en cuenta que en algunos puntos el ancho es de 4,00 m. El grado de incertidumbre por las condiciones propias del proyecto se estima que el valor de $N = 8,3 \times 10^5$ ejes equivalentes de 8,2 toneladas en los 10 años de servicio y una confiabilidad del 75%.

Un valor de $N = 4,5 \times 10^5$ ejes equivalentes de 8,2 toneladas en los 5 años de servicio y una confiabilidad del 75% y un valor de $N = 2,7 \times 10^5$ ejes equivalentes de 8,2 toneladas en los 2,5 años de servicio para una confiabilidad del 75%. Los números estructurales estimados a través de la ecuación de la AASTHO para las mezclas asfálticas, para un CBR de diseño de 5,1%.

Figura 64. Modelación número estructural.

The figure displays three sequential screenshots of the AASHTO 93 software interface, showing the calculation of structural number (SN) for different service periods. Each window is titled 'Ecuación AASHTO 93' and contains the following fields:

- Tipo de Pavimento:** Pavimento flexible (selected) and Pavimento rígido.
- Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So):** 75 % Zr=-0.674 and So = 0.45.
- Serviciabilidad inicial y final:** PSI inicial = 4.2 and PSI final = 2.0.
- Módulo resiliente de la subrasante:** Mr = 7650 psi.
- Tipo de Análisis:** Calcular SN (selected) and Calcular W18.
- Número Estructural:** SN = [calculated value].
- W18:** [calculated value].

The three screenshots correspond to service periods of 10 años, 5 años, and 2,5 años, with the following calculated values:

Período de Servicio (años)	Número Estructural (SN)	W18
10 años	2.96	895000
5 años	2.66	450000
2,5 años	2.46	270000

Fuente: AASTHO - 93

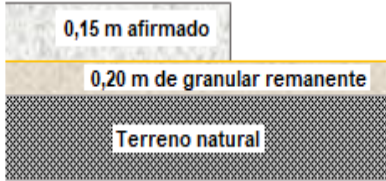
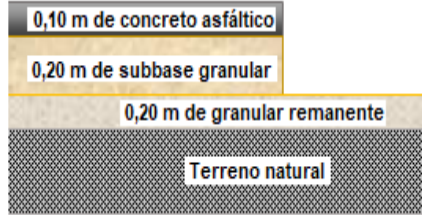
La modelación multicapa de los espesores equivalentes bajo los criterios anteriormente establecidos, específicamente para las mezclas asfálticas es la siguiente:

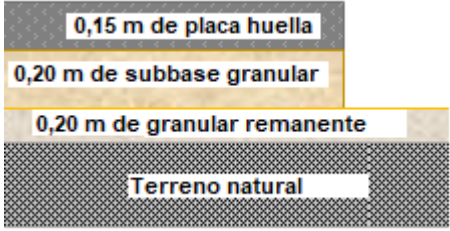
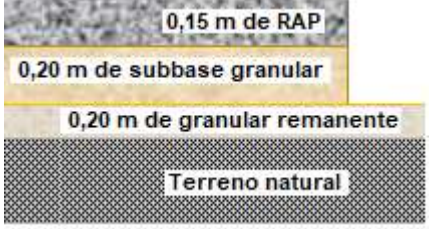
Tabla 22 modelación espesores equivalentes

CON LA CARPETA ASFÁLTICA (5 AÑO)								
CARPETA	a1	0.40	D1	3.9	m1	1.00	10.0	2.66
SUB BASE	a3	0.11	D3	8	m3	0.80	20.0	
EXISTENTE	a4	0.06	D4	8	m4	0.80	20.3	
CON RAPA (2,5 AÑO)								
RAP	a1	0.25	D1	5.9	m1	1.00	15.0	2.46
SUB BASE	a3	0.11	D3	8	m3	0.80	20.0	
EXISTENTE	a4	0.06	D4	6	m4	0.80	15.0	

Fuente: El Autor

Tabla 23 Matriz de comparación por alternativas

No.	TIPOLOGIA DE PAVIMENTO	COMPARACIONES		
		COSTOS	MÉTODOS	ENSAYOS
1	 0,15 m afirmado 0,20 m de granular remanente Terreno natural	A corto plazo las intervenciones con este material generan una recuperación paliativa, sin embargo a mediano y largo plazo no.	El artículo 300 - 13 de las especificaciones generales de construcción del Invías, establece procesos, ensayos, parámetros de calidad para la construcción de afirmados y otras capas y el artículo 311-13, describe de manera puntual y su cumplimiento, respecto del desgaste, gradación, solidez, límites limpieza y resistencia.	Los ensayos tenidos en cuenta son Gradaciones, límites, desgaste mecánico y químico. Limpieza y unas tolerancias respecto de la geometría de las partículas relativas a los ensayos anteriormente mencionados.
2	 0,10 m de concreto asfáltico 0,20 m de subbase granular 0,20 m de granular remanente Terreno natural	Este tipo de mezcla es un tratamiento que se cumple en la mayor parte de las vías colombianas, se adapta a cualquier condición climática y sus costos son relativamente altos, para vías de bajo nivel de tráfico se aplican en ciertos lugares	Respecto del concreto asfáltico se deben cumplir toda una serie de características que se encuentran establecidas en el capítulo 4 de las especificaciones generales de construcción de Invías. El artículo 450 determina como deben ser los procesos y la calidad de los agregados para estas mezclas y el artículo 410 la calidad del ligante.	El diseño de la mezcla se realiza a través de un diseño Marshall en el cual se hallan los óptimos de bitumen, de vacíos y temperaturas de instalación y compactación, esto para mezcla en caliente. Agregados y bitumen se someten a ensayos de calidad que permitan conseguir mezclas resistentes a la abrasión e la intemperie.

3		En una alternativa buena desde el punto de vista técnico, es especialmente utilizada en vías de montaña y condiciones extremas de pendiente, sin embargo, por su costo la aplicación es restringida a pequeños tramos con problemas de transitabilidad, de unos años para acá se ha empleado con mayor intensidad.	El Invías cuenta con una Guía de diseño de este tipo de pavimentos que presenta recomendaciones para la geometría, distribución de materiales, refuerzos, obras de drenaje, suelos y demás.	Los ensayos de laboratorio, al igual que las demás mezclas, obedecen a la necesidad de asegurar resistencia química y mecánica al ataque del tránsito y el medio ambiente, adicionalmente para el acero y el cemento constitutivos de estos pavimentos se incorpora otros adicionales.
4		Es una alternativa económica ya que el insumo básico de su preparación es donado y solo se costea el procesamiento y los aditivos, aplicado de manera correcta siguiendo un proceso técnico en el diseño, la instalación y el curado, puede tener un periodo de vida de cerca del 60 al 70% del periodo de diseño del pavimento asfáltico.	No existe una metodología precisa para el tratamiento de este tipo de material, sin embargo existen guías a partir de procesos empleados en la estabilización de materiales granulares y apartes dentro de las tablas de las especificaciones en que se fijan pautas para el manejo de la adición a los agregados del RAP. El artículo 461-07 parametriza reciclaje en el sitio y fija procesos y gradaciones de trabajo así como adiciones.	El diseño se realiza a través de los ensayos de inmersión compresión, que se emplean en mezclas en frío bajo lo cual se establecen los porcentajes de adición que provocan las mejores condiciones de resistencia en aire y bajo inmersión. Los demás ensayos de agregados y emulsiones son comunes a los otros materiales, adicionalmente se realizan ensayos para determinación del remanente de bitumen envejecido.

Fuente: El Autor

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Vemos como la evaluación del comportamiento de los materiales de RAP asociados con adiciones de emulsión asfáltica, cemento hidráulico y materiales granulares procesados dieron buenos resultados para la construcción de mezclas bituminosas a partir en las cuales más del 65% de los insumos provienen de los desechos de pavimentos asfálticos de contratos de mantenimiento del IDU y de la UMV del Distrito Capital.

Gracias al proceso de diseño de las mezclas, a la gestión en la construcción y el cuidado con el curado de las mismas se logró conseguir una estabilidad tal que incrementó su duración de ellas y la esperanza de vida del material combinado a más de dos (2) años, luego de los cuales se atenuaron las circunstancias patológicas de daño que se presentaban antes de dar inicio a esta gestión investigativa.

Este trabajo representa un claro ejemplo de cómo con herramientas mínimas de gestión y criterios técnicos claros provocan buenos resultados de calidad a partir de materiales de reciclado adecuadamente trabajados.

10.1. CONCLUSIONES

Inicialmente se encontró un problema de calidad que se reflejó en una patología severa de fisuración y deformación plástica de pavimentos construidos a partir de una estabilización de RAP con emulsión asfáltica, por lo que nace la necesidad de activar un programa de auscultación, levantamiento de fallas y gestión de cambios de las zonas intervenidas a fin de determinar el origen de las fallas.

En este sentido se realizaron trabajos de campo, de laboratorio y oficina así como un análisis detallado de caso que nos permitió aplicar criterios nacionales y recomendaciones extranjeras provenientes del Departamento de Transportes de los Estados Unidos y de la Comisión Europea del Asfalto para ajustar las labores técnicas tendientes a mitigar la condición de daño de la mezcla. La normativa nacional relacionada con las mezclas en frío, normas Invías e IDU, fue una herramienta fundamental para hacer los ajustes pertinentes y en conjunto conformar criterios propios de trabajo de los cuales surge una metodología de

trabajo bajo unos parámetros técnicos específicos para este tipo de material, con algunas restricciones asociadas a la naturaleza y el origen del insumo.

En conclusión, las mejores combinaciones fueron el resultado de RAP entre 68 y 69%, agregado mineral en 20%, cemento asfáltico de 3,5%, cemento hidráulico entre 1 y 1,5%, para un porcentaje de concreto asfáltico reciclado promedio de 2,5%. Existieron aspectos que fueron ajustados en obra, como es el caso del manejo de las humedades y el proceso de curado de las mezclas.

Resultaron tres capas, una de subbase granular tipo B400 de 0,20 m de espesor, una capa de 0,09 material estabilizado de base con el uso de RAP de la UMV y una capa de 0,09 mezcla con RAP del IDU para un total de 0,15 m compacto, este diseño se materializó en la construcción de varios tramos y específicamente el tramo de cuatro (4) kilómetros que sirvió de base para el seguimiento de su comportamiento en el tiempo y con la respectiva aplicación de carga de trabajo.

El procedimiento de auscultación del tramo en observación fue realizado luego de dos (2) años de su ejecución, dio como resultado un adecuado comportamiento superficial, se presentaron algunas fallas puntuales que básicamente fueron atribuidas a problemas de drenaje, a fallas en los procesos de construcción y a condiciones de irregularidad propias del tipo de material.

Los resultados de análisis de la patología de daños bajo la metodología de la Guía de rehabilitación de Inviás estableció un índice de deterioro de superficial $I_s = 3$, con las fallas encontradas, índices de daño y fisuración de uno (1).

Dentro del mismo análisis de la condición de la mezcla, pasados los dos (2) años se realizó la deflectometría del tramo a través de la Viga Benkelman y sus resultados fueron procesados mediante los programas DEFLEX – IMPACO y modelados mediante el Programa Everstress 5.0. del Departamento de transportes del Estado de Washington en los Estados Unidos y con los cuales se pudo encontrar que el pavimento construido desde hacía dos (2) años presenta una capacidad estructural remanente capaz de soportar 75 mil ejes equivalentes de 8,2 toneladas en su capa granular y 598 millones de ejes equivalentes en la mezcla de RAP, por lo que se esperaría que el pavimento tenga una falla por deformaciones de los granulares antes que se deteriore el RAP existente.

En un tercer escenario se da sobre tramos de la malla vial de la Localidad de Usme, donde fueron intervenidos varios tramos que en su totalidad suman cerca de cinco (5) kilómetros de longitud. En este caso se conservaron los principios establecidos en las intervenciones anteriores y adicionalmente se incorporó una capa superficial de micro pavimento lo cual mejoró de manera importante la

condición superficial de pavimento. A la fecha esta intervención realizada hace un (1) año, no presenta ningún tipo de patología.

Finalmente, y gracias a las evaluaciones de campo y oficina se propuso una norma técnica particular que busca ajustar los actuales procedimientos que se tienen para el manejo del RAP.

10.2. RECOMENDACIONES

La instalación de las mezclas de reciclaje en frío con el RAP, como materia prima, establecen un especial procedimiento constructivo y un manejo de materiales que permita conjugar las características mecánicas y químicas remanentes de los materiales ya utilizados con las adiciones de los materiales nuevos.

El primer paso para el desarrollo de proyectos de esta naturaleza es el análisis detallado de los agregados y hacer los diseños de las mezclas en el laboratorio, construir tramos de prueba y llevar los desarrollos a la obra, evaluar su comportamiento y hacer los ajustes del caso.

Las bases estabilizadas con RAP, son especialmente sensibles a los cambios de saturación, por lo menos en la fase de curado, la cual tiene un proceso inicial de varios días hasta un par de meses, tiempo en el cual la mezcla alcanza cierto nivel de dureza.

Estas mezclas con el tiempo presentan algunas fisuras que reflejan la presencia de un porcentaje de cemento asfáltico envejecido, sin embargo, la regularidad superficial se mantiene y se podría pensar en establecer un esquema de sello de estas fisuras o incluso un micro pavimento, luego de pasado el tiempo de curado cuando el módulo del material alcance un determinado nivel.

Los reciclajes provenientes de la UMV, aunque presentan una cierta similitud con los del IDU, finalmente al tamizarlos son algo más heterogéneos, presentan una mayor contaminación y mayores valores de humedad, por lo que se hace necesario un proceso de adecuación del material. Los materiales del IDU son más homogéneos.

Es importante que, para mejorar los procesos de construcción de los pavimentos con RAP, los materiales sean clasificados, si sus tamaños son superiores a las 3" es aconsejable pasarlo por trituradora y en todos los casos cribarlos para una correcta dosificación, la revisión de las plantas de trituración en zonas cercanas al

proyecto puede ser un factor importante, así como el transporte del material a fin de conseguir un adecuado producto terminado.

Es recomendable, en todos los casos, la adición de material granular, en proporciones variables, el apoyo de la gestión de calidad del laboratorio es fundamental en el éxito de los proyectos y en este sentido aún más, ya que se trata de agregados que no se conoce de manera real como fueron recuperados, porque ciclos de intemperie pasaron antes de llegar al sitio de obra, y la naturaleza de sus finos, por tal razón su caracterización es fundamental como agregado pétreo y como cementante ya que se encuentran impregnados con el concreto asfáltico remanente del proceso de demolición o fresado y su efecto debe ser verificado ya que el nivel de envejecimiento del bitumen también es variable y este es un factor importante en la cohesión de las mezclas.

10.3. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Durante los diferentes procesos de trabajo, en campo, oficina y laboratorio se pudieron detectar los siguientes elementos susceptibles de ser investigados de manera más profunda:

- 1 Los efectos de la tipología del cemento hidráulico utilizado en los procesos de mezcla en campo presentaron diferencias importantes ya que por alguna razón algunos de ellos, siendo Portland tipo 1, no reaccionaban de la misma forma en el proceso de curado, algunos de ellos generaban mezclas mucho más rígidas para una misma proporción.
- 2 El grado de deterioro de concreto asfáltico de estas mezclas tiene incidencias en el resultado final y en la durabilidad de las mezclas. De alguna forma el envejecimiento del cemento asfáltico incide en la calidad de la mezcla en la etapa de servicio ya que concretos asfálticos recuperados aparentemente más antiguos generan luego del paso de unos meses una mayor tendencia a presentar pérdida de ligante.
- 3 La incidencia del paso del agua sobre las mezclas con RAP a edad temprana es fundamental para la duración de la mezcla. Se observó que aquellas mezclas que tuvieron un contacto temprano con el agua se deterioraron de manera mucho más rápida que las que estaban protegidas, razón por la cual se debe observar la variable de pérdida de resistencia en inmersión de manera exclusiva para este tipo de mezclas.

4 Los resultados de la auscultación con viga Benkelman generaron valores de capacidad remanente del pavimento supremamente altos, de alguna forma los módulos de rigidez de estas mezclas cambiaron en el tiempo, sería importante indagar acerca de esta circunstancia.

5 Finalmente, la decisión de emplear un Slurry Seal para cubrir estas mezclas generó un mejor aspecto superficial de los pavimentos lo cual abre la posibilidad de combinar procesos de trabajo con materiales reciclados y nuevos, esto da pie para investigar los tipos de relación físico químicas que puedan darse entre estas mezclas.

11. BIBLIOGRAFIA

1. ABRAHAM, Herbert, 1960a, Historical review and natural raw materials (v. I), in Asphalts and allied substances, 6th ed.: New York, Van Nostrand, 370 p.
2. ARENAS Lozano, Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. Editorial Faid. Tercera edición. Abril de 2003. Cali Colombia. 304 pg.
3. BUITRAGO Zarabanda Juan Felipe, GONZÁLEZ Méndez Ashley Nataly. Tesis: CARACTERIZACIÓN DEL RAP E IDENTIFICACIÓN DE SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, 2016.
4. CARLSON D, Douglas, Asphalt – Rubber, An Anchor to Crumb Rubber Markets, UNCTAD, International Rubber Forum. Veracruz 1999.
5. CASTELLANOS Barreto Jaime Salón, SOCHA Alfonso Raúl Andrés. Tesis: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN PAVIMENTOS DE ESPESOR COMPLETO DE ASFALTO RECICLADO (RAP) ESTABILIZADO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA Y ADICIÓN DE CEMENTO PORTLAND TIPO 1, SIN INTERVENCIÓN DE LA SUBRASANTE. Universidad Piloto de Colombia. Bogotá, 2014.
6. Botasso, Hugo Gerardo, Utilización del caucho en las mezclas asfálticas, Universidad Tecnológica Nacional, Regional la Plata, Buenos Aires Argentina. Centro de Investigaciones Viales. S.f.
7. CAMACHO Plata Herver. Tesis: “ESTUDIO SOBRE PAVIMENTOS RECICLADOS COMO POSIBLE ALTERNATIVA ECONÓMICA Y AMBIENTAL EN LAS FUTURAS OBRAS DEL PAÍS. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. 2014.
8. CORPORACIÓN ECOVERSA, Contrato SSA/COLB/2009/000012039. IDEAM – FONDO PARA EL LOGRO DE LAS

ODM - ONU. Indicadores, tendencias y escenarios hidrológicos para el cambio del clima. Junio de 2009. Bogotá, 174 Pág.

9. Departamento Nacional de Estadística DANE. Indicadores económicos alrededor de la construcción. 2020, Bogotá.

10. GARNICA, Anguas Paul, GÓMEZ, López José Antonio, SESMA, Martínez Jesús Armando. Mecánica de materiales para pavimentos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes – Instituto Mexicano del Transporte. Publicación 197, Safandila, México, 2002.

11. HERNÁNDEZ Hernández Pablo José. Tesis: Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2014.

12. INDIANA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) under Super pave specifications. Sponsor by: Departments of Transportation the Illinois, Indiana, Iowa, Michigan, Minnesota, Missouri and Wisconsin. FHWA / IN / JTPR 2002/6. May2002.

13. KUEHI Ranae, KORZILIUS Joe, MARTI Michael. LRRB Local Road Research Board. Synopsis of recycled asphalt pavement (RAP) materials. Minnesota Department of Transportation. 30 p. June 2016.

14. LOCARNER, Robert. Analysis of using reclaimed asphalt pavement (RAP) as a base course material. Colorado Department Transportation. TDT Apple Research and Innovation Branch. re Port No. CPUD 2009. February 2009

15. MÉNDEZ Revollo Angelica Andrea. Tesis: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) EN VÍAS COLOMBIANAS. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. 2015.

16. NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. High RAP asphalt Pavement. Japan practice – Lessons learned. Information series 139. 2015.

17. S.A. Tabatabaie, H. Ziari and M. Khalili, 2008. Modeling Temperature and Resilient Modulus of Asphalt Pavements for Tropic Zones of Iran. Asian Journal of Scientific Research, 1: 579-588.
18. SHAMES, Irving H. Introducción a la mecánica de los sólidos. Editorial Prentice / Hall International. Englewood Cliffs, New Jersey, 1975. 502 pg.
19. Galvis Vergara, J. & A. Huguet Granados: Rocas volcánicas basálticas en la región de Lauruaco. Departamento del Atlántico - Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 32(124): 353-359, 2008. ISSN 0370-3908.
20. MONTEJO, Alfonso. "Ingeniería de pavimentos para carreteras". Universidad Católica de Colombia. Bogotá, 2001.
21. OLIVERA, Fernando B. "Estructuración de las vías terrestres". CECSA. México 1996. (Segunda Edición).
22. OSTOS Ascencio Jeame Liliana, DUARTE Sanmiguel Juan Mauricio y REYES Ortiz Oscar Javier. Artículo de investigación: COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DEL INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO CON ADICIÓN DE PAVIMENTO RECICLADO. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá. 2011.
23. PRADYUMNA T Anil, MITTAL A bhsherk and P.K. Jain. Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG). Procedia - Social and Behavioral Sciences 104 (2013) 1149 – 1157. 2013.
24. RESTREPO Sierra Héctor Alberto y STEPHENS Zapata Steve Alexander. Monografía: RECICLAJE DE PAVIMENTOS. ESTUDIO DE LAS VENTAJAS ECONÓMICAS DEL RECICLAJE EN FRÍO IN SITU DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. Universidad de Medellín. Medellín, 2015.

25. REYES, Fredy L. "Diseño de pavimentos por métodos racionales". Tomo I. Universidad de Los Andes. Bogotá 1999.
26. SABOGAL, Fernando S. "Pavimentos". Tomo I, Universidad La Gran Colombia. Bogotá 1992.
27. SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. "Addendum to the Shell pavement design manual". London 1985.
28. SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED. "Shell pavement design manual". London 1978.
29. Unidad de Planeamiento Minero Energético UPME. – Consorcio Proyección. Evaluación de la situación actual y futura del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y eje cafetero. Contrato No. 19547 – 004 – 2013. Bogotá, 2014.
30. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal highway Administration. Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures. State of the practice. Publication No. FHWA – HRT – 11 – 021. April 2011.
31. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal highway Administration. Pavement recycling guidelines for state and local governments Publication No. FHWA – S.A. – 98 – 042. December 1997.

Referencias en línea

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/indicadores-economicos-alrededor-de-la-construccion>

<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/169095/EXPLORACION+DE+MATERIALES.pdf/fc129902-1523-4764-9a05-755e3bb7896e>

http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Evaluacion_situacion_actual_futura_del_mercado_de_los_materiales.pdf

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/11021/11021.pdf>

<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/33835>

<file:///C:/Users/ING%20ROBIN/Downloads/9470-26423-1-SM.pdf>

https://www.asphaltpavement.org/?option=com_content&view=article&id=201&Itemid=774

11. ANEXOS

11.1. ANEXO 1. SOPORTES DE PARTICIPACIÓN

11.2. ANEXO 2. ENSAYOS DE LABORATORIO

FOTOGRAFÍAS



Material estabilizado de RAP con un recubrimiento de micro-pavimento o Slurry Seal. Contrato de obra de la Localidad de Usme.



Aspecto vías rurales construidas con RAP, con cuneta lateral.



Las obras de drenaje forman parte integral de la estructura vial protegiendo el pavimento, para este tipo de mezcla resulta ser fundamental ya que la presencia de agua superficial o de infiltración bajo las capas granulares o en su superficie causan el deterioro prematuro del material e inciden de manera directa en su deterioro, más que en cualquier otro tipo de pavimento.