

**METODOLOGÍA DE CAMPO PARA DETERMINAR EL APORTE ESTRUCTURAL
DE CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUB-BASE ELABORADAS A PARTIR DE LA
REUTILIZACIÓN DEL RAP**



Andrés Ricardo Ibarra Enríquez, Ing.

Orientador: Ferney Quiñones Sinisterra, Ph.D.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
INSTITUTO DE POSTGRADO EN INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS**

POPAYÁN, JUNIO DE 2017

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	4
2. JUSTIFICACIÓN	5
3. OBJETIVOS	6
3.1 Objetivos generales	6
3.2 Objetivos específicos.....	6
4. MARCO REFERENCIAL	8
4.1 Conceptos básicos para la evaluación estructural de capas granulares.....	8
4.1.1 Rehabilitación de pavimentos.....	8
4.1.2 El RAP – Pavimento asfáltico reciclado (Recycled asphalt pavement).	9
4.1.3 Ensayo de Viga Benkelman.....	10
4.1.4 Modulo resiliente de materiales granulares.....	12
4.2 Marco Teórico para la evaluación estructural de capas granulares obtenidas de la mezcla RAP y otros granulares.	13
4.2.1 Esfuerzos en materiales granulares.	13
4.2.2 Técnicas de evaluación estructural.....	15
4.3 Requisitos establecidos en la normatividad convencional para bases y sub-bases granulares. .	16

5. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES QUE LIMITAN EL USO DEL RAP COMO INSUMO DE CAPA GRANULAR DE BASE Y/O SUB-BASE DEL PAVIMENTO.....	19
5.1 Análisis de la normatividad vigente con respecto al uso del RAP como insumo de capas granulares.	22
5.1.1 En Colombia.....	22
5.1.2 En Estados Unidos y otros países.	24
5.2 Experiencias respecto a la utilización del RAP en instalación de capas granulares.	24
5.3 Identificación de los problemas en la implementación del uso del RAP en la normatividad vigente	25
6. PROYECCIÓN DE LA METODOLOGÍA BÁSICA.....	28
6.1 Alternativas posibles para reutilizar el RAP como insumo de capas de Base y Sub-base granular.....	29
6.1.1 Alternativa A. Reutilización del RAP en acopio o sitio de acondicionamiento.....	32
6.1.2 Alternativa B. Reutilización del RAP in-situ.	34
6.2 Metodología básica para reutilizar el RAP como insumo de capas de Base y Sub-base granular.	
36	
7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	39
7.1 B02, SP-MB-A2: Evaluación de emplazamiento de la capa y del proceso industrial – proyecto de rehabilitación.	40
7.2 B04, SP-MB-A1-02 Desarrollo Prueba piloto fresado y recomendación agregado adicional. ...	42
7.3 L02, SP: LAB-SBG: Identificación y resultados de caracterización en laboratorio para para sub-base granular.....	43
7.4 L04, SP: LAB-SBG-01: Diseño de mezcla para sub-base granular.	43

7.5 L06, SP: LAB-SBG-02: Caracterización de los materiales para para sub-base granular.	44
7.6 V01, SP: VE-01: Comparación de CBR para diferentes proporciones de RAP y material granular adicionado.	45
7.7 V02, SP: VE-02: Evaluación de resistencia mediante el ensayo de Módulo Resiliente.	46
7.8 B06, SP: MB-A2-02: Determinación de resistencia de capas de apoyo -CBR.	47
7.9 B08, SP:MB-A2-03: Ensayos de deflectometría de la capa granular con RAP para la alternativa In-situ.	48
7.10 B09, SP: AI-01: Recopilación de datos de resistencia de las capas y análisis de Retrocalculo.	
50	
7.11 B10, SP: AI-02: Análisis de resistencia característica adoptada para el diseño.	55
7.12 B11, SP: AI-03: Ajuste del diseño y comparación de costos.	57
8. RECOMENDACIONES DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	63
8.1 Sobre la evaluación de emplazamiento de la capa y del proceso industrial.	63
8.2 Sobre la piloto fresado y recomendación agregado adicional.	64
8.3 Sobre el diseño de mezcla y caracterización del material.	64
8.4 Sobre la verificación especial con ensayos de CBR y ensayos de módulo resiliente de las mezclas.	65
8.5 Sobre la determinación de Resistencia de las capas de apoyo.	65
8.6 Sobre los ensayos de deflectometría de la capa granular con RAP.	66
8.7 Sobre la recopilación de datos de resistencia y análisis de retrocalculo.	66
8.8 Sobre el análisis de resistencia característica adoptada para el diseño.	67
8.9 Sobre el ajuste del diseño y comparación de costos.	67
CONCLUSIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA	71

ANEXO No 1. FICHAS PROPUESTAS PARA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

(Explicación detallada de los sub-procesos y modelo de fichas).

ANEXO No 2. APLICACIÓN METODOLOGÍA - PROYECTO ESPECÍFICO

LISTA DE GRAFICAS

Grafica No 1. Actividad de fresado y reciclado de pavimento en vía.....	10
Grafica No 2. Actividad de fresado con equipo fresadora en frio. (Obsérvese la ubicación del tambor de fresado y la posibilidad del mismo de no cargar a la banda transportadora).	10
Grafica No 3. Ecuación constitutiva del material granular donde se observa que el módulo resiliente está en función del primer invariante de tensiones (Θ).	14
Grafica No 4. Comparativo de los procesos de diseño de pavimentos (cálculo directo) y Retrocalculo.	15
Grafica No 5. Esquema de modelización de cálculo inverso desarrollado con la viga beamkelman.	16
Grafica No 6. Alternativas de reutilización del RAP como capas de base o sub base granular.	31
Grafica No 7. Metodología básica para reutilizar el RAP como insumo de capas de Base y Sub-base granular.	37
Grafica No 8. Localización del Sector Cano - Mojarras, Ruta 25, Tramo 02.....	40
Grafica No 9. Evaluación de la geometría y estado del pavimento del proyecto de aplicación.	41
Grafica No 10. Especificación particular de Sub-base granular con RAP.....	41
Grafica No 11. Aparte de la Ficha SP: MB-A2-01	42
Grafica No 12. Aparte del resultado de Gradación de la mezcla RAP60% y SBG-50 40%. SP:LAB-BG-01-01.....	43
Grafica No 13. Aparte del resultado de Gradación de la mezcla RAP100%. SP:LAB-SBG-01-03	44

Grafica No 14. Aparte del resultado de Caracterización del RAP y Granular adicionado. SP:LAB-SBG	44
Grafica No 15. Aparte del resultado de evaluación de Resistencia al CBR del RAP en las mezclas evaluadas. SP: VE-01	45
Grafica No 16. Comparación de K1, K2 obtenidos en el estudio realizado por la Universidad de Minnesota y los obtenidos en el Proyecto Especifico	46
Grafica No 17. Sector donde se desarrollaron las pruebas de resistencia, PR 94+0990, Vista Sur - Norte.....	47
Grafica No 18. Distribución de ensayos de resistencia a las capas de apoyo. SP:MB-A2-02.....	47
Grafica No 19. Resultados de ensayos de resistencia de las capas de apoyo. SP:MB-A2-02.	48
Grafica No 20. Localización de ensayos de Viga Benkelman Capa Granular con RAP. SP: MB-A2-03.....	48
Grafica No 21. Calibración de la carga de la volqueta y ensayo de viga Benkelman.....	49
Grafica No 22. Resultado de ensayo de Viga Benkelman sobre material Granular con RAP. SP: MB-A2-03	49
Gráfica No 23. Recopilación de datos de resistencia de las capas y análisis de Retrocalculo - Proyecto específico.	51
Grafica No 24. Resultados seleccionados del proceso de análisis de retrocalculo, SP:AI-01 - Proyecto específico.	53
Grafica No 25. Comparativo de diagrama de esfuerzos verticales entre dos (2) modelos de carga de la viga benkelman, de 8.2 ton. y 3.5 ton. - Proyecto específico.	55
Grafica No 26. Análisis de la resistencia característica de la capa de Granular con RAP adoptada en el diseño con base en la metodología y condiciones de diseño del pavimento. Aplicación del proyecto específico.....	56

Grafica No 27. Variables de diseño proyectadas en los estudios del proyecto específico.....	58
Grafica No 28. Resumen del proceso de optimización del diseño del proyecto específico.....	61
Grafica No 29. Evaluación de costos referente al uso del RAP - Proyecto específico	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Documentación del INVIAS relacionada con la implementación de la metodología propuesta de reutilizar el RAP como insumo de bases y sub-bases granulares.	23
--	----

El comité a cargo de este trabajo de grado certifica que Andrés Ricardo Ibarra Enríquez, aprobó los requisitos para optar el título de Máster en Ingeniería de Pavimentos.

Director

Fecha

Fecha

Fecha

Fecha

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

JUNIO DE 2018

RESUMEN

Observándose antecedentes internacionales y ante la ausencia de especificaciones y políticas nacionales que promuevan la reutilización del RAP (Recycled Asphalt Pavement) como insumo de capas granulares, el presente trabajo se enfoca en brindar una metodología para evaluar en campo el aporte estructural de estas capas, como iniciativa y fundamento para fomentar el aprovechamiento del RAP en capas de base y sub-base granular, siendo esto consecuente con la preservación del medio ambiente y la economía en los proyectos viales, convirtiéndose en una alternativa de reciclaje, requiriéndose menores recursos tecnológicos para su implementación en cualquier proyecto.

La metodología propuesta se plantea para ser desarrollada en campo, con efecto de disponer por parte de quienes diseñan y ejecutan un proyecto de rehabilitación o mejoramiento la manera más rápida para definir la forma de utilizar el RAP, determinar la caracterización de los materiales involucrados y obtener el aporte estructural de la capa granular compuesta de RAP, con objeto de optimizar el diseño del pavimento, reduciéndose así los costos y disminuyéndose con ello la utilización de nuevos materiales granulares. Para la evaluación estructural, la metodología propone el desarrollo de pruebas deflectométricas con viga benkelman y otras pruebas de campo que pueden ser contrastadas mediante ensayos de laboratorio; con la información obtenida y analizada se realiza el proceso de retrocálculo, para obtener finalmente el módulo resiliente de la capa granular compuesta de RAP en las condiciones de esfuerzo a ser sometida; con lo cual se demostró como en otras investigaciones que las capas granulares compuestas con RAP ofrecen igual o superior resistencia que las capas normales de base y sub-base granular, y su implementación y desarrollo genera economía y sostenibilidad.

ABSTRACT

Observing international precedents and in the absence of national specifications and policies that promote the reuse of RAP (Recycled Asphalt Pavement) as an input of granular layers, the present work focuses on providing a methodology to evaluate in the field the structural contribution of these layers, such as initiative and foundation to promote the use of RAP in base layers and granular sub-base course, being this consistent with the preservation of the environment and economy in road projects, becoming a recycling alternative, requiring less technological resources for its implementation in any project.

The proposed methodology is proposed to be developed in the field, with the effect of having on the part of those who design and execute a rehabilitation or improvement project the quickest way to define the way to use the RAP, determine the characterization of the materials involved and obtain the structural contribution of the granular layer composed of RAP, in order to optimize the design of the pavement, thus reducing costs and thus decreasing the use of new granular materials. For the structural evaluation, the methodology proposes the development of deflectometric tests with benkelman beam and other field tests that can be contrasted by laboratory tests; With the information obtained and analyzed, the retro-calculation process is carried out, in order to finally obtain the resilient module of the granular layer composed of RAP under the stress conditions to be submitted; with which it was demonstrated as in other investigations that the granular dandruffs composed with RAP offer equal or superior resistance than the normal layers of base and sub-base course, and its implementation and development generates economy and sustainability.

INTRODUCCIÓN

Frente al desarrollo de proyectos de mejoramiento y/o rehabilitación de pavimentos, normalmente se evalúa la posibilidad de reciclar el material asfáltico disponible en la estructura existente como medida de mitigación del impacto ambiental y la eventual economía hacia los proyectos; pero, ante la limitación de tecnología, bien sea por falta de equipos especializados para realizarse In-situ o procesos industriales especiales con considerables distancias de acarreo para realizarse en planta, se ha optado por renunciar o limitar a estas prácticas, sin contar que el mismo efecto esperado en el aspecto ambiental y económico se puede generar reutilizándose el material RAP en capas granulares no ligadas, como así lo practican diferentes países en todo el mundo, sin que ello se haya implementado en nuestro país de forma estandarizada.

Al respecto, el presente estudio se enfoca en la reutilización del RAP (Recycled Asphalt Pavement), material proveniente de la disgregación de la carpeta asfáltica envejecida mediante el proceso de fresado, para efecto de su aprovechamiento en capas de base granular y sub-base granular de la estructura del pavimento; para lo cual, en su desarrollo se expone los análisis necesarios para plantear una metodología que determine su correcta utilización en los procesos de rehabilitación de pavimentos con el objeto de desarrollar esta actividad con el debido análisis técnico, promoviéndose su utilización y el aprovechamiento adecuado del material como una alternativa económica y ambientalmente amigable.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Como delimitación del problema se observa los siguientes aspectos:

- No existe una política de promoción del uso del RAP como insumo de capas granulares, lo que se evidencia en la ausencia de normativa o procedimientos aplicables a nivel nacional; teniendo en cuenta que el uso de este material solo se enfoca al reciclaje (materiales ligados) y no la reutilización del mismo en materiales granulares no ligados.
- No se dispone una metodología de evaluación estructural de campo para la utilización de materiales granulares provenientes de mezclas con RAP que brinde una orientación en el desarrollo de este proceso, considerándose que actualmente en algunos proyectos se utiliza con un análisis insuficiente y sin aprovechar debidamente este insumo, brindando mayor economía y sostenibilidad del medio ambiente.
- Al requerirse determinar el módulo resiliente de la capa granular con RAP para establecer su resultado como parámetro en el diseño del pavimento, se esperaría determinar valor mediante el ensayo de laboratorio que lleva su nombre, pero por su limitada asequibilidad, es viable optar por obtenerse mediante una evaluación deflectométrica en campo; la cual, en condiciones de segmentos reducidos como es el caso, es preferible utilizar la viga beamkelman porque los equipos de alto rendimiento resultan difícilmente utilizables por su costo y disponibilidad, en cambio este equipo resulta apropiado, económico y viable con el apoyo de otros ensayos de campo con los cuales se obtendría el resultado en menor tiempo y con aproximación aceptable para su implementación en el diseño.

2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia y países latinoamericanos, el tema del reciclaje y la utilización del RAP (Recycled Asphalt Pavement) empezó a desarrollarse desde la llegada de los equipos tipo fresadoras a inicios de los años 90, donde se observó la utilidad de evitar el deterioro del pavimento con el remplazo de la denominada “Excavación de la reparación del pavimento asfáltico”; actividad que se desarrollaba con el corte y remoción de las capas asfálticas con equipos de corte - excavación, alterándose con ello las capas contiguas por el esfuerzo de corte para realizar la actividad y generándose un desecho que usualmente llegaba a los depósitos de escombros o en el mejor de los casos se reutilizaba para accesos vehiculares en zonas rurales.

Hoy en día, el desechar el RAP se encuentra restringido por las entidades nacionales que desarrollan proyectos estatales, adicionalmente el proceso de extracción del RAP, en las especificaciones se establece realizarse con equipos fresadores, brindándose con ello la opción de reciclar el material en capas asfálticas.

Por lo expuesto, se debe considerar necesario disponer de una alternativa viable de aprovechar el RAP con el mismo efecto de economía y preservación del medio ambiente; tal es el caso de las capas granulares de base y sub-base cuyo insumo incluya el RAP, para promover su reutilización, porque las mezclas de granulares con este insumo sustentan iguales o mejores calidades de resistencia que las generadas con capas granulares convencionales, siendo éste último un aspecto fundamental para garantizar que la reutilización del material se lleva a cabo de forma óptima, con mitigación de los efectos ambientales y económicos que el mismo reciclaje para capas asfálticas y con trascendencia a la utilización en estructuras proyectadas con pavimentos rígidos y articulados, previendo que estas también dispone de capas de sub-base y base granular.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivos generales

Determinar una metodología para establecer en campo el aporte estructural de capas granulares provenientes de la mezcla de RAP y materiales granulares remanentes¹, o adicionados, aprovechando este material como insumo de capas de base y sub-base granular en la estructura del pavimento.

3.2 Objetivos específicos

- Analizar las condiciones que limitan el uso adecuado del RAP en los proyectos de rehabilitación y sustentan la necesidad de disponer de una metodología que establezca el proceso para usar el RAP como insumo de capa granular de base y/o sub-base granular de la estructura del pavimento.
- Plantear la metodología básica y sus complementos para la evaluación estructural en campo de capas granulares provenientes de la mezcla de RAP con granulares remanentes o materiales nuevos adicionados con base en experiencias y conocimientos teóricos aplicados en aras de utilizar dichas mezclas como capas de Base granular o sub-base granular.
- Aplicar la metodología básica y sus complementos en un proyecto vial en desarrollo para ajustar y precisar aspectos metodológicos a tener en cuenta, realizándose pruebas de evaluación estructural de capas granulares provenientes de la mezcla de RAP y granulares (remanentes o no), mediante deflectometría, pruebas de CBR y verificación con antecedentes de pruebas dinámicas.

¹ Se le denomina “material remanente”, al material a utilizarse en el pavimento de capas antiguas del pavimento, para el caso, base o sub-base del pavimento antiguo a rehabilitarse.

- Contrastar los resultados de resistencia y demás características de los materiales evaluados con las exigidas para las bases y sub-bases granulares en la construcción de pavimentos con las normativas colombianas vigentes.
- Recomendar sobre aspectos específicos de la metodología para la implementación en diferentes proyectos de rehabilitación y mejoramiento de carreteras.

4. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se describe el contexto conceptual, teórico y legal que procede en el planeamiento y desarrollo de actividades de rehabilitación involucradas en el proceso de diseño, mantenimiento y/o reconstrucción de pavimentos existentes, donde se puede llevar a cabo actividades de fresado de capas asfálticas y se pueda reutilizar el RAP como insumo de una capa granular implementándose su uso como base o sub-base granular.

4.1 Conceptos básicos para la evaluación estructural de capas granulares.

4.1.1 Rehabilitación de pavimentos

El proceso de rehabilitación de pavimentos de todo tipo, involucra un mejoramiento funcional o estructural del pavimento, que da lugar tanto a una extensión de su vida de servicio, como a la provisión de una superficie de rodamiento más cómoda y segura y a reducciones en los costos de operación vehicular (INVIAS - Guía Metodologica de Rehabilitación, 2008).

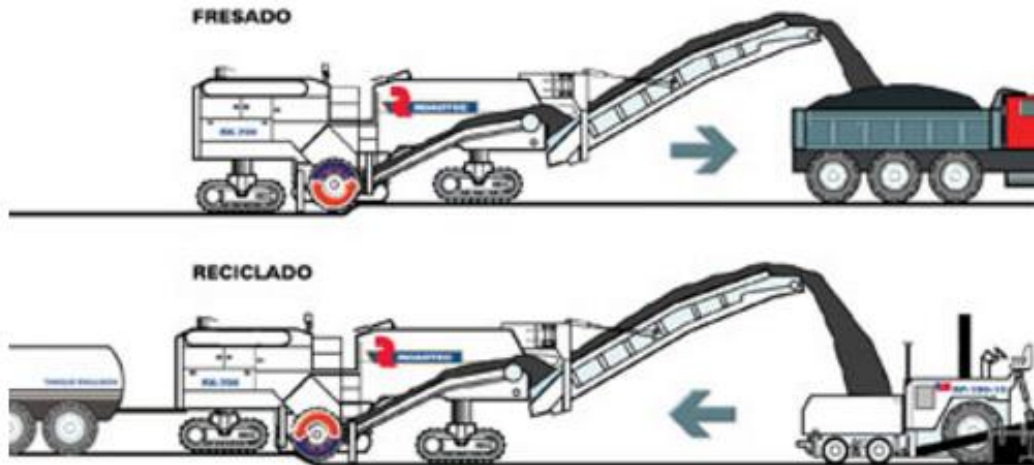
Para efecto de la utilización del RAP en el proceso de rehabilitación de un pavimento convencionalmente se trataría únicamente de hablar del reciclado para obtener un pavimento flexible, pero en el contexto de reutilizar el RAP como una capa granular del pavimento, se podría aplicar a todos los tipos de pavimento, porque en cada uno de ellos las capas granulares forman parte de su estructura, bien sea como capa que aporta principalmente resistencia en el caso de pavimentos, flexibles, articulados o semi-rígidos, o bien en pavimentos rígidos, donde proporciona apoyo uniforme y estable en el tiempo, porque en éste último, el mayor aporte de resistencia lo adopta principalmente la capa de concreto de hormigón.

Como se debe considerar, las actividades de reciclaje y reconstrucción son las últimas etapas de la vida de un pavimento, donde la actividad de reciclaje se puede llevar a cabo y el desarrollo del diseño de las intervenciones podrán proponer la implementación de una estructura que reutilice el material fresado RAP, bien sea con los planteamientos normales establecidos de capas ligadas o, determinar utilizar el material como una capa granular.

4.1.2 El RAP – Pavimento asfáltico reciclado (Recycled asphalt pavement).

En realidad el término del RAP debería denominarse material asfáltico fresado, porque viene del proceso de fresado de maquinaria especializada, entonces los dos términos se definen así:

- **Fresado:** Actividad desarrollada para remover y fraccionar el material en partículas de diferente tamaño, una capa asfáltica deteriorada, mediante un equipo tipo fresadora que dispone un tambor de fresado que contiene unas picas de vástago, dispuestas de tal manera que el material se desprenda y se fraccione. Estos equipos dispone de un sistema de carga frontal, que permite el cargue del material extraído a las volquetas y; también, dispone la función de proceder a únicamente fresarse y dejarse en el sitio que se fresa. (WIRTGEN, Grup Company, 2016)
- **Reciclado:** Actividad que involucra además del fresado, la adición de un ligante y/o material granular adicional, extensión y compactación de una capa asfáltica; dicha actividad se puede llevar en el mismo sitio de extracción o realizarse en planta de asfaltos para efecto que posteriormente se extienda y compacte el material reciclado. (WIRTGEN, Grup Company, 2016, pág. 14)



Grafica No 1. Actividad de fresado y reciclado de pavimento en vía.

Fuente: (Saez, 2010, pág. 1)



Grafica No 2. Actividad de fresado con equipo fresadora en frio. (Obsérvese la ubicación del tambor de fresado y la posibilidad del mismo de no cargar a la banda transportadora).

Fuente: (WIRTGEN, Grup Company, 2016, págs. 11,12 y 14)

4.1.3 Ensayo de Viga Benkelman.

En la Norma de Ensayos del INVIAS 2.013 el ensayo de viga Benkelman se estipula su desarrollo mediante el artículo INV-E-795-13 con el nombre “MEDIDA DE LAS

DEFLEXIONES DE UN PAVIMENTO ASFÁLTICO EMPLEANDO LA VIGA BENKELMAN”; su objeto se establece así:

Esta norma describe el procedimiento a seguir para la determinación estática de la deflexión elástica recuperada de un pavimento asfáltico empleando la viga Benkelman. A tal fin, se utiliza un camión donde la carga, el tamaño de neumáticos, el espaciamiento entre ruedas duales y la presión de inflado están normalizados. (INVIAS, Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, 2013, pág. 2554)

Obsérvese que el INVIAS establece esta norma de ensayos para la determinación estática de la deflexión sobre pavimentos asfáltico, pero no se menciona su posible utilidad para el desarrollo en materiales granulares; al respecto, su aplicación en los materiales granulares es el mismo, exceptuando que la medida de temperatura no es necesaria. Para el ensayo en materiales granulares, es preferible utilizar la viga doble para obtener mayor información, determinando parte del cuenco de deformación, información que se puede utilizar para apreciar el comportamiento global de la capa y determinar un punto adicional para obtener el módulo resiliente del material en el proceso de retrocálculo.

Para efecto de definir las características del equipo y algunos aspectos tratados en los resultados, la norma de ensayo define:

- **Viga Benkelman** – Es un deflectómetro mecánico simple. Un brazo móvil, suspendido en un bastidor a través de un pivote, transmite la deflexión vertical del punto de medida a un dial medidor. (INVIAS, Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, 2013, pág. 2555).
- **Deflexión total (dt)** – Deformación vertical y puntual de una superficie de pavimento bajo la acción de una carga.

- **Cuenco de deflexión** – Línea de influencia de la deformada del pavimento debido a la aplicación de una carga determinada.
- **Vehículo de carga** – El vehículo usado para cargar el pavimento deberá ser un camión que lleve una carga de prueba de 80 kN (18 000 lbf) en un eje trasero simple con sistema de rueda doble. Los neumáticos serán de 10.00 – 20 y tendrán una presión de inflado tal, que la presión de contacto sobre el pavimento sea de 552 kPa (80 lbf/pg²). (INVIAS, Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, 2013, pág. 2558).

4.1.4 Módulo resiliente de materiales granulares.

Módulo Resiliente: Es una relación que vincula las solicitaciones aplicadas y las deformaciones recuperables al suprimirse el estado de tensiones impuesto. (Angelone, Martínez, & Cauhape Casaux, 2000, pág. 5).

Ecuación 1

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Con el Modulo resiliente de un material se provee de:

- La relación básica entre tensiones y deformaciones de un material de construcción de pavimentos para su uso en el análisis estructural multicapa de un pavimento.
- Un medio de evaluar materiales para la construcción de pavimentos, bajo una variedad de condiciones ambientales y estados de tensiones, simulando las condiciones de trabajo bajo acción de las cargas.

De acuerdo a la Norma de Ensayos de Materiales se especifica su procedimiento y requisitos mediante la norma INV E-156-13 “Módulo resiliente de suelos y agregados”; su objeto se establece así:

Este método describe procedimientos para la determinación del módulo de resiliencia de suelos de subrasante y de materiales granulares de base y de sub-base. Incluye la preparación de las muestras y el ensayo bajo condiciones que simulan, razonablemente, las características físicas y los estados de esfuerzos de los materiales en pavimentos flexibles sometidos a las cargas móviles del tránsito. (INVIAS, Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, 2013, pág. 554).

En síntesis, el ensayo se describe así:

Consiste en someter a una probeta cilíndrica del material, confeccionada en condiciones representativas de aquellas que se esperan en el sitio, a una presión de confinamiento (σ_3) y a la acción de un tensor desviador axial pulsante de magnitud, duración y frecuencias fijados (σ_d); y registrar la magnitud de la deformación axial resiliente recuperable de la probeta (ϵ_r). (Benavides Bastidas, Caracterización Dinámica de Materiales, 2016, pág. 29):

4.2 Marco Teórico para la evaluación estructural de capas granulares obtenidas de la mezcla RAP y otros granulares.

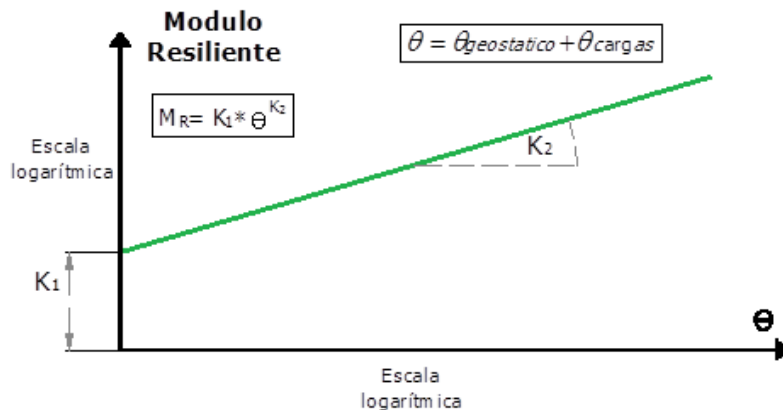
Observados los principales conceptos básicos vistos anteriormente, en el marco teórico se tratarán aspectos que relacionan aspectos que sustentan el contexto técnico que se propone con el presente capítulo, en síntesis, sustentar el enfoque brindado a la determinación de una metodología de campo para establecer la resistencia y propiedades de un material granular compuesto por RAP con y sin material granular adicionado para efecto de formar parte de la estructura de pavimento.

4.2.1 Esfuerzos en materiales granulares.

Para efecto de establecer las características de resistencia del material granular bastaría únicamente con realizar pruebas de módulo resiliente para establecer bajo cualquier condición de

esfuerzos el Módulo Resiliente, parámetro fundamental para el diseño de pavimentos. Es de entender que en el curso de las obras y proyectos, esta actividad involucra enviar muestras a laboratorios especializados que realicen la prueba, teniendo que esperar los resultados un tiempo valioso en el proceso industrial del proyecto. Además se ha observado que en el desarrollo de estas pruebas se requiere disponer de personal con alto grado de experiencia que logre preparar la muestra y simular debidamente la condición de esfuerzos a la que el material particularmente estará sometido.

Seguramente se podría afirmar que el mismo efecto para determinar la resistencia se logra también con un ensayo de CBR de campo o laboratorio, pero es de anotar que aunque este ensayo puede entregar un valor de relación de resistencia muy usado en desarrollo de pavimentos, las características de la prueba no brindan una información del efecto de condición de esfuerzos que dispone el material en el sitio y su efecto debido a las condiciones tensionales que puede tener un material; lo descrito anteriormente se refleja en el siguiente concepto:



Grafica No 3. Ecuación constitutiva del material granular donde se observa que el módulo resiliente está en función del primer invariante de tensiones (θ).

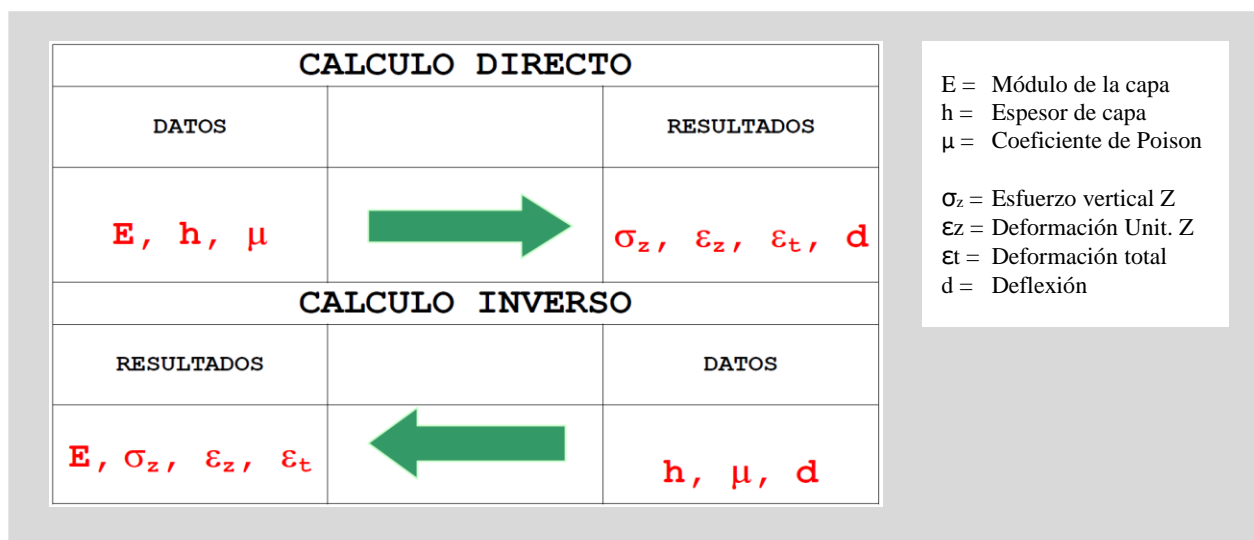
Fuente: (Benavides Bastidas, Caracterización Dinámica de Materiales, 2016, pág. 57)

Por lo expuesto, se puede determinar que “A mayor esfuerzo tensional se somete un material granular, mayor será el resultado del Módulo resiliente del material”. (Benavides Bastidas, Caracterización Dinámica de Materiales, 2016, pág. 57)

Como se puede observar la prueba convencional de CBR limitaría la característica que se pretende evaluar para el efecto de determinar la resistencia real que dispondrá el material en las condiciones específicas de cada proyecto y características del material.

4.2.2 Técnicas de evaluación estructural.

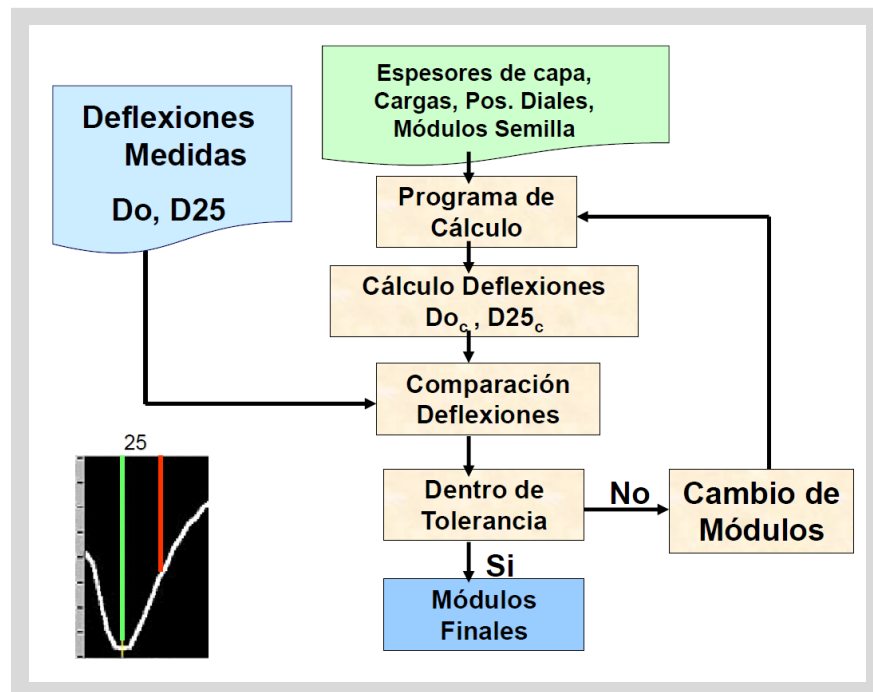
Normalmente en el diseño de pavimentos efectuado por cualquier método disponible, se pretende determinar principalmente las dimensiones de las capas del pavimento en función de las propiedades de dichas capas, las solicitudes (transito), condiciones de la subrasante y condiciones específicas del sector a diseñar, a ello se le denomina el “CALCULO DIRECTO”, para el caso tratado en el presente estudio se pretende determinar las propiedades de un material en las condiciones específicas de un determinado proyecto para el caso se parte de datos definidos de espesores y características de respuesta a las cargas conocidas mediante equipos que miden la deformación - deflexión, a este proceso se lo denomina “CALCULO INVERSO O RETROCALCULO” (Vergara B., 2014, pág. 9).



Grafica No 4. Comparativo de los procesos de diseño de pavimentos (cálculo directo) y Retrocálculo.

Fuente: (Vergara B., 2014, pág. 9)

Para efecto de exponer el procedimiento de cálculo inverso a desarrollar con información generada con Viga Beankelman se dispone del siguiente proceso:



Grafica No 5. Esquema de modelización de cálculo inverso desarrollado con la viga beamkelman.

Fuente: (Benavides, Conferencia de rehabilitación de pavimentos, 2016, pág. 67)

4.3 Requisitos establecidos en la normatividad convencional para bases y sub-bases granulares.

En coherencia de direccionar los procesos de formulación de una metodología para utilizar mezclas de material RAP con otros granulares para disponer de capas de base y sub-base granular para pavimentos, es indispensable hacer seguimiento a la normativa respecto a los requisitos establecidos convencionalmente para su construcción, principalmente los concernientes a las características de los materiales, los cuales como es el caso de Colombia, se establecen en las Especificaciones Generales de Construcción del INVIAS y particularmente los definidos en los Artículos 320-13 “Sub-base granular” y 330-13 “Base granular” lo cual se resume en las Tabla No 320-2 “Requisitos convencionales de los agregados para sub-bases granulares”, Tabla No 320-3

“Requisitos convencionales de granulometría para sub-bases granulares”, Tabla No 330-2 “Requisitos convencionales de los agregados para bases granulares” y Tabla No 330-4 “Requisitos convencionales de granulometría para bases granulares” de dichas especificaciones generales.

Frente a estos requisitos convencionales para disponer de capas granulares de un pavimento, es indispensable evaluar los siguientes aspectos, teniendo como premisa considerar que un gran porcentaje del material de la mezcla de RAP y otros granulares pueden ser una capa granular:

- Respecto a las características de dureza y durabilidad requeridas para estos materiales, es claro que los agregados que conforman el RAP, provienen de materiales seleccionados que alguna vez cumplían los mejores estándares de calidad respecto a estos requisitos y que sus propiedades de dureza y durabilidad se mantiene indemnes después de realizarse el fresado.
- Respecto a la característica de limpieza, se debe observar que este requisito está previsto para evitar que partículas adheridas al material no generen efectos contrarios de resistencia o estabilidad del material en el tiempo como son las arcillas o materiales orgánicos. A diferencia de ello el RAP podrá tener partículas asfálticas que sin pretender que pueda aportar en algo la cohesión de los materiales, éstas partículas no generan efectos contrarios a los previstos en la evaluación de esta característica, porque sus componentes son inertes y estables física y químicamente en un muy largo periodo de tiempo.
- Respecto a la característica de geometría de las partículas, es procedente destacar que este requisito será uno de los factores a considerar como relevantes en la evaluación del material, toda vez que la forma de los agregados del RAP dependerá de las características de abrasión que desarrolla la máquina fresadora y sus características serán determinantes en la buena o mala calidad de este proceso.

- Respecto a la resistencia del material, se espera que por sus características de resistencia por su origen proveniente de materiales de buena calidad, el conjunto de la mezcla RAP y agregado adicionado provean iguales o mejores respuestas frente a este requisito.
- Respecto a la gradación de los materiales, es procedente evaluar que ésta es la principal característica a resolver con la adición de agregados remanentes (existentes en el sitio – bases antiguas) o materiales vírgenes, según sea el caso, para lo cual se deberá diseñar el proceso de adición para el cumplimiento de esta característica.

5. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES QUE LIMITAN EL USO DEL RAP COMO INSUMO DE CAPA GRANULAR DE BASE Y/O SUB-BASE DEL PAVIMENTO

En el desarrollo de las actividades de rehabilitación de los proyectos viales se realizan importantes inversiones, la mayoría de éstas, involucra recuperar total o parcialmente las estructuras deterioradas; al hacerlo, se evalúa: ¿Qué hacer? con los desechos de las remociones de los materiales que se encuentran en las estructuras del pavimento a rehabilitar; en ocasiones involucrándose las capas granulares y en la mayor parte de las veces, los materiales provenientes del fresado de los pavimentos asfálticos; de tal manera que, se tiene tres (3) opciones: Desecharlos, Reutilizarlos y Reciclarlos:

a) Desechar:

Por lo general la utilización del RAP (Recycled Asphalt Pavement) se ha visto limitada al rechazo del material directamente, tendiendo a desperdiciarlo o a sub-utilizarlo, debido a que no se cuenta con la disponibilidad de reciclarse como una nueva capa asfáltica, o este material no cumple con la gradación especificada para capas superiores de base y sub-base y/o se considere que este material no cumpla con la resistencia para implementarse como un material granular dentro de la estructura del pavimento, teniendo que retirarse del sitio consumiendo costos de extracción y transporte.

b) Reciclar:

En contraste, la aplicación del reciclado que es la utilización del material RAP como insumo de una capa asfáltica, consiste básicamente en un proceso industrial que involucra inicialmente el estudio de los materiales extraídos, su diseño de mezcla con aditivos rejuvenecedores y eventualmente adición de asfalto y agregados para que en planta o in-situ

con su aprovechamiento se convierta en una nueva capa asfáltica; lo cual, se ha convertido en la mejor opción de reutilización del RAP; pero a pesar de disponer de normativas y procesos establecidos, no se implementa masivamente en Colombia y en otros países, debido a diferentes factores como la falta de implementación tecnológica, la falta de planeación, las pretensiones económicas de particulares en contravía de las prácticas de reciclaje, el desconocimiento y presunta complicación.

A pesar de lo expuesto, recientes artículos técnicos realizados en Colombia que tratan el tema del reciclado del RAP, exponen argumentos como el siguiente:

El uso de pavimentos asfálticos reciclados para la construcción y rehabilitación de carreteras es un tema que ha venido creciendo desde hace años, debido a la reutilización y potencialización de los materiales existentes que contribuye al medio ambiente por la disminución de explotación de canteras en búsqueda de nuevos agregados, sin embargo, no existe una guía clara de esta técnica y por tanto es poco utilizada. (Rebollo Mendez, 2015, pág. 3).

Diferentes experiencias a nivel nacional evidencia resultados favorables en cuanto a propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas recicladas, así como resultados de buen comportamiento y una reducción de costos considerable.

Igualmente; hay otros factores adicionales o relacionados a los anteriores que obligan a prescindir de esta actividad, volviéndose a la posibilidad de desecharlo o como sucede en diferentes proyectos, reutilizarlos como granulares en capas inferiores, entre estos factores están:

- Por efecto de la necesidad de modificar el proyecto geométrico o por interés de realizar la obra con agilidad se utiliza el RAP como rellenos o mejoramiento de subrasante.
- Aunque se pudiera tener toda la tecnología y disponibilidad para realizar el reciclado, éste proceso se puede volver más costoso, tal es el caso de reciclado en caliente, procesado en

planta, donde por los costos del transporte y la implementación tecnológica, se podría evaluar como inviable en algunos casos.

- Un aspecto que limita el reciclado in-situ, el cual podría ser la solución del anterior, son las modificaciones geométricas que pueda tener un proyecto lo cual impediría el proceso, limitándose el reciclado a realizarse únicamente a nivel superficial, sobre proyectos que no han alterado la geometría vertical y horizontal, en espesores menores de 30 cm.

c) Reutilizar:

En contraste de lo anterior, surge la necesidad de aprovechar el material RAP como capa granular de base y/o sub-base, lo cual es una alternativa que garantiza el aprovechamiento del 100% del material con procesos de fácil desarrollo, económicos y acordes con el proyecto geométrico afectado por el diseño, aplicándose con ello los principios fundamentales que llevan a aprovechar de forma óptima estos materiales: Economía y Sostenibilidad del Medio Ambiente.

El limitante de hacerlo actualmente será entonces, la incertidumbre de adecuarlo a las características exigidas para ese tipo de capas granulares de base y/o sub-base, enfrentándose principalmente a resolver el requisito de resistencia y acondicionamiento granulométrico.

De lo expuesto anteriormente, se deduce que reciclar es la mejor opción, pero resulta una actividad que en muchas circunstancias es imposible de implementar; entonces, la segunda opción es reutilizarse, pero no de una manera deficiente sino de forma eficiente, preferiblemente en las bases y sub-bases granulares, de tal manera que el objeto de reciclar y reutilizar sea el mismo: “Se aproveche el material en un 100% y se reduzca en la misma cantidad que se recupera del RAP, la cantidad de materiales que se extraerán de una fuente; lográndose así, la reducción del impacto ambiental deseado y su economía frente a la extracción, proceso y transporte”.

5.1 Análisis de la normatividad vigente con respecto al uso del RAP como insumo de capas granulares.

A continuación, se exponen los aspectos normativos que disponen diferentes países frente a la reutilización del RAP como insumo de una capa granular de base y sub-base, teniendo en cuenta que siendo normas, de ello dependerá o no de la implementación y desarrollo en los proyectos de rehabilitación que involucre la reutilización de estos materiales de la forma que espera realizarse mediante el presente estudio.

5.1.1 En Colombia.

Como es de conocimiento general, la utilización del RAP en Colombia se ha visto limitada únicamente en la aplicación del proceso de reciclado, existiendo para ello tecnología y normativa detallada para su implementación, entre ésta tenemos:

El INVIAS (Instituto Nacional de Vías) establece como proceso de reciclado lo siguiente:

- ART. 461 Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos
- ART. 462 Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente

El IDU (Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá D.C.) establece como proceso de reciclado lo siguiente:

- 450-11 Reciclaje de Pavimento Asfáltico en el Sitio con Emulsión Asfáltica
- 451-11 Reciclaje de Pavimento Asfáltico en el Sitio con Asfalto espumado
- 452-11 Empleo de agregados pétreos a partir de concreto hidráulico reciclado
- 454-11 Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con cemento portland

Obsérvese que éstas entidades no disponen de una normativa para usar el material RAP como insumo para elaborar una base o sub-base granular; únicamente se limitan a formular procesos de reciclado, lo cual es lo más conveniente para condiciones locales de las ciudades capitales y zonas de disponibilidad de plantas de asfaltos y/o equipos especializados para esta labor, pero no se ha evaluado la necesidad de implementar análisis de conveniencia en zonas distantes donde no se cuenta con dichos recursos tecnológicos y donde si se aplican actividades que en combinación de las mismas se podría desarrollar el proceso de elaborar bases y sub-bases granulares que como insumo principal sea el RAP; entre éstas normas se tiene:

NORMATIVA DE REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Especificaciones generales de construcción del INVIAS, 2013, Artículo 300	Disposiciones generales para la ejecución de afirmados, sub-bases y bases granulares y estabilizadas.
Especificaciones generales de construcción del INVIAS, 2013, Artículo 320	Disposiciones para la construcción de Sub-Bases granulares.
Especificaciones generales de construcción del INVIAS, 2013, Artículo 330	Disposiciones para la construcción de Bases granulares.
Especificaciones generales de construcción del INVIAS, 2013, Artículo 460	Disposiciones para el desarrollo del fresado de pavimentos asfálticos.
Guía Metodológica para el diseño de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras	Proceso para desarrollar la rehabilitación de pavimentos en carreteras de Colombia
Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del INVIAS, Artículo INV-E-795-13	Medida de las deflexiones de un pavimento asfáltico empleando la viga benkelman
Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del INVIAS, Artículo INV E-156-13	MÓDULO RESILIENTE DE SUELOS Y AGREGADOS

Tabla 1. Documentación del INVIAS relacionada con la implementación de la metodología propuesta de reutilizar el RAP como insumo de bases y sub-bases granulares.

Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de mezclas de RAP con granulares se viene haciendo en diferentes proyectos de rehabilitación de carreteras de manera deficiente, utilizándose como rellenos o terraplenes, sin

estimar su verdadera conveniencia económica y de impacto social y ambiental que podría lograrse aprovechándose en capas de base y sub-base granular.

5.1.2 En Estados Unidos y otros países.

A diferencia de lo anterior, en Estados Unidos se dispone de estudios y normativa que establece el uso del RAP como insumo de los materiales de base y Sub-base granular; al respecto, se observa que en los diferentes departamentos de transporte de cada estado se permite la mezcla del material desde valores bajos como el 10% en bases, hasta valores altos del 75% en bases y sub-bases, igualmente se permiten tamaños máximos de 3". (Hoppe, Lane, & Fitch, 2015, págs. 15-19). De igual manera se destaca que la Administración Federal de Carreteras FHWA en reporte de la Publicación No FHWA-RD-97-148 "La guía del usuario para el uso de RAP en bases y sub-bases granulares no ligadas" determina que el coeficiente estructural de la metodología AASHTO para el diseño puede establecerse entre 0.11 a 0.14 para proporciones del 30% y si el valor se excede se realizaría un ajuste del coeficiente. (Federal Highway Administration (FHWA), 2016, pág. 5).

En algunos países de Europa se tiene prohibido desechar el RAP y principalmente se lo utiliza en el reciclado, teniéndose que utilizar hasta el 100% del material en mezclas ligadas. (Hoppe, Lane, & Fitch, 2015, págs. 15-19).

5.2 Experiencias respecto a la utilización del RAP en instalación de capas granulares.

Es de anotar que en países desarrollados como Estados Unidos, la práctica de utilizar el RAP (Recycled Asphalt Pavement) con adición de material de base granular es recurrente, tanto como el reciclaje ligado con asfalto, denominado como RPM (Recycled Pavement Material) y en diferentes estados se han promovido investigaciones para su caracterización, evaluación

estructural, determinación de propiedades y demás, para su implementación dentro de la política de aprovechamiento, claro está, con tecnología de vanguardia, tanto en la evaluación como en la construcción; entre estas investigaciones se llevó a cabo una encuesta a nivel nacional desarrollada por la Universidad de Wisconsin, dirigida a personas con alguna conexión de trabajo con las agencias de transporte estatales y federales que participan en pavimentos, formulándose 13 preguntas cuyas respuestas de 33 representantes de entidades estatales de Estados Unidos se resumen en el aprovechamiento del material RAP en bases y sub-bases como más usado que en el mismo reciclado de mezclas asfálticas (materiales ligados). (Schaertl & Edil, 2009, pág. 3),

Como es de conocimiento general en Estados Unidos, la tecnología y adquisición de maquinaria especializada es más asequible que en países como Colombia; entonces se podría preguntar el ¿por qué se sigue utilizando esta práctica habiendo tecnologías de reciclaje que involucran el proceso con materiales ligados?; como aspecto importante a analizar en el presente trabajo, se podría deducir según lo expuesto en las encuestas presentadas, que si así es allá donde se dispone de todos los recursos se siguen esas prácticas, en países latinoamericanos como el nuestro, donde la maquinaria y tecnología cuesta tanto y es tan difícil disponerse, entonces será mayor la proporción o tendencia a utilizarse el RAP material para elaborar capas granulares que formen parte de la estructura del pavimento. Al respecto, se debe considerar que no se dispone de un análisis técnico de estas prácticas, las cuales si se realizan en el país, pero sin planificar y evaluar sus resultados para disminuir los costos de los proyectos.

5.3 Identificación de los problemas en la implementación del uso del RAP en la normatividad vigente

En países latinoamericanos como Colombia, la normatividad de construcción de carreteras se ha referenciado básicamente en la normativa de los Estados Unidos como las del AASHTO

(American Association of State Highway and Transportation Officials) o FHWA (Federal Highway Administration), entre otras; normas que se han fundamentado en investigación y experiencias tecnológicas que continuamente se actualizan. Al respecto, como se observó anteriormente, el proceso de incorporación del RAP en mezclas de bases y sub-bases granulares aunque en otros países se lleva desarrollando desde hace varios años, solo hasta hace pocos años se ha establecido especificaciones y/o recomendaciones normativas para su implementación; entonces, solo resta que en las próximas actualizaciones de la normativa de los países latinoamericanos se preste atención a esta posibilidad y para ello se desarrolle una verificación de su implementación.

Frente a los aspectos que pueden observarse como dificultades para determinar que la actividad de reutilizar el RAP como insumo de capas granulares de base y sub-base se encuentran:

➤ **Promoción exclusiva del uso del RAP para reciclado (desarrollo de nuevas capas asfálticas):**

No existe una política técnico-ambiental de promoción del uso del RAP para su utilización como granular de base o sub-base granular; teniendo en cuenta que en la normativa y técnica en este tipo de procesos en Colombia y otros países únicamente se la promociona el desarrollo del reciclaje (materiales ligados) y no la reutilización de este tipo de material.

➤ **No existe una metodología de evaluación estructural de campo o laboratorio para la utilización del RAP como insumo de capas de base y sub-base:**

Entre los argumentos que normalmente se analizan en los proyectos de rehabilitación se encuentran:

- El RAP es un material que tiene una gradación abierta y no cumple con las características granulométricas de base y sub-base convencionales.

- Las bases y sub-bases granulares se deben desarrollar con granulometrías continuas y de tipo uniforme² de acuerdo a las especificaciones de construcción.
- No existe ningún procedimiento o norma de ensayos definido para establecer su aporte estructural, aunque existen procedimientos de laboratorio para hacerlo a materiales relacionados como la base y sub-base convencionales.
- Respecto a la evaluación de materiales en campo, como los descritos como convencionales, las normas relacionan ensayos de deflectometría como una posible información a utilizar pero no se define su uso e interpretación para determinar su aporte estructural.³

➤ **No existe antecedentes documentados de la aplicación de la alternativa de usar RAP como insumo de capas granulares de base y sub-base:**

Al no disponer de documentos técnicos que sustente el uso de esta alternativa de reutilización del RAP, es consecuente considerar que las entidades estatales no tienen fundamentos para disponer en las normas la aplicación de estos procedimientos en las obras.

Por lo tanto, el presente estudio se enfoca en resolver cada aspecto tratado, direccionando los análisis a sustentar con base a conceptos, referencia de experiencias y pruebas documentadas la posibilidad de aplicar esta alternativa de reutilizar el RAP como insumo de capas granulares de base y sub-base granular.

² De acuerdo a las características granulométricas se pueden clasificar así: Si el tipo de curva granulométrica es uniforme entonces es de gradación continua y si no es discontinua; también de acuerdo al coeficiente de curvatura se determina que es uniforme o no uniforme. (Bañon Blazquez & Bevia García, 2000, págs. 15-8)

³ Las Especificaciones Generales de Construcción del INVIAS – Colombia, establecen en el numeral 300.5.3 el desarrollo de medidas de deflexión para efecto de verificar la solidez de la estructura para bases y sub-bases.

6. PROYECCIÓN DE LA METODOLOGÍA BÁSICA

De acuerdo a lo expuesto en la justificación del presente trabajo, la necesidad de disponer de un soporte técnico para la planificación en el proceso de reutilizar del RAP como insumo de capas granulares para pavimentos es una necesidad fundamental que aún no se ha resuelto, debido las características del proceso de fresado y su adecuación granulométrica específica en cada caso, su implementación se debe desarrollar en campo, cuando finalmente se dispone de la posibilidad de hacer una prueba piloto, tanto de los equipos a utilizar como del resultado del material obtenido, con base en las características propias de la carpetas asfáltica antigua a ser reutilizada.

Por lo expuesto, se debe considerar necesario determinar el aporte estructural de las mezclas de RAP y granular remanente o RAP y adición de materiales granulares, para promover la reutilización de materiales que se encuentran en el sitio con objeto de construirse capas de base o sub-base granular y no capas inferiores de terraplén o mejoramiento de la subrasante, por que las mezclas con este insumo sustentan mayores calidades de resistencia que las estimadas para dichas capas inferiores.

Al finalizar el presente capítulo se postula la metodología de campo para la evaluar estructuralmente capas granulares provenientes de la mezcla de RAP y granulares remanentes o granulares recién triturados, utilizando pruebas de deflectometría con equipo de viga beamkelman, sustentado su empleo e implementación en pruebas desarrolladas sobre pavimentos en su etapa preliminar de construcción para diferentes condiciones de soporte de subrasantes y variaciones de mezclas para incidir en la estructura del pavimento definitiva de una manera viable, compitiéndose con su implementación con el reciclado, toda vez que el RAP, dispone de partículas con

características iguales o mejores que las exigidas para bases o sub-bases granulares y en efecto ambiental tendrá igual efecto que en dicho proceso de reciclado, porque disminuirá la explotación de las fuentes de materiales y el consumo de combustibles para el procesamiento.

Es de conocimiento general que para elaborar una mezcla asfáltica se requiere aproximadamente de un 5% de ligante asfáltico y 95% de agregados provenientes de una fuente, éstos últimos, cuyas características de estas partículas cumple condiciones exigentes de resistencia, dureza, durabilidad, limpieza, geometría y adhesividad; dichas características, son similares a las exigidas para los materiales de base granular, lo cual sustenta decir que para desarrollar una mezcla asfáltica o una base granular se requiere de una fuente de semejantes características; en tal circunstancia, al utilizar el RAP material que provino de una mezcla asfáltica y reutilizarlo como base granular tendrá en términos de impacto ambiental el mismo beneficio, porque se ahorraría explotar la fuente para efecto de obtener el material, sin tener que efectuar procesos de estabilización que podrían verse limitados como se observó anteriormente, en cambio el reutilizarlo como capa granular superior (base o sub-base) promueve la facilidad de realizarlo, lográndose una economía directa que favorece su desarrollo en zonas distantes y en proyectos donde el proceso de reciclaje no se pueda llevar a cabo, lográndose entonces una alternativa que aunque en Colombia y países latinoamericanos no se ha evaluado detenidamente en otros países como Estados Unidos se observa como una práctica normal como se ha expuesto.

6.1 Alternativas posibles para reutilizar el RAP como insumo de capas de Base y Sub-base granular.

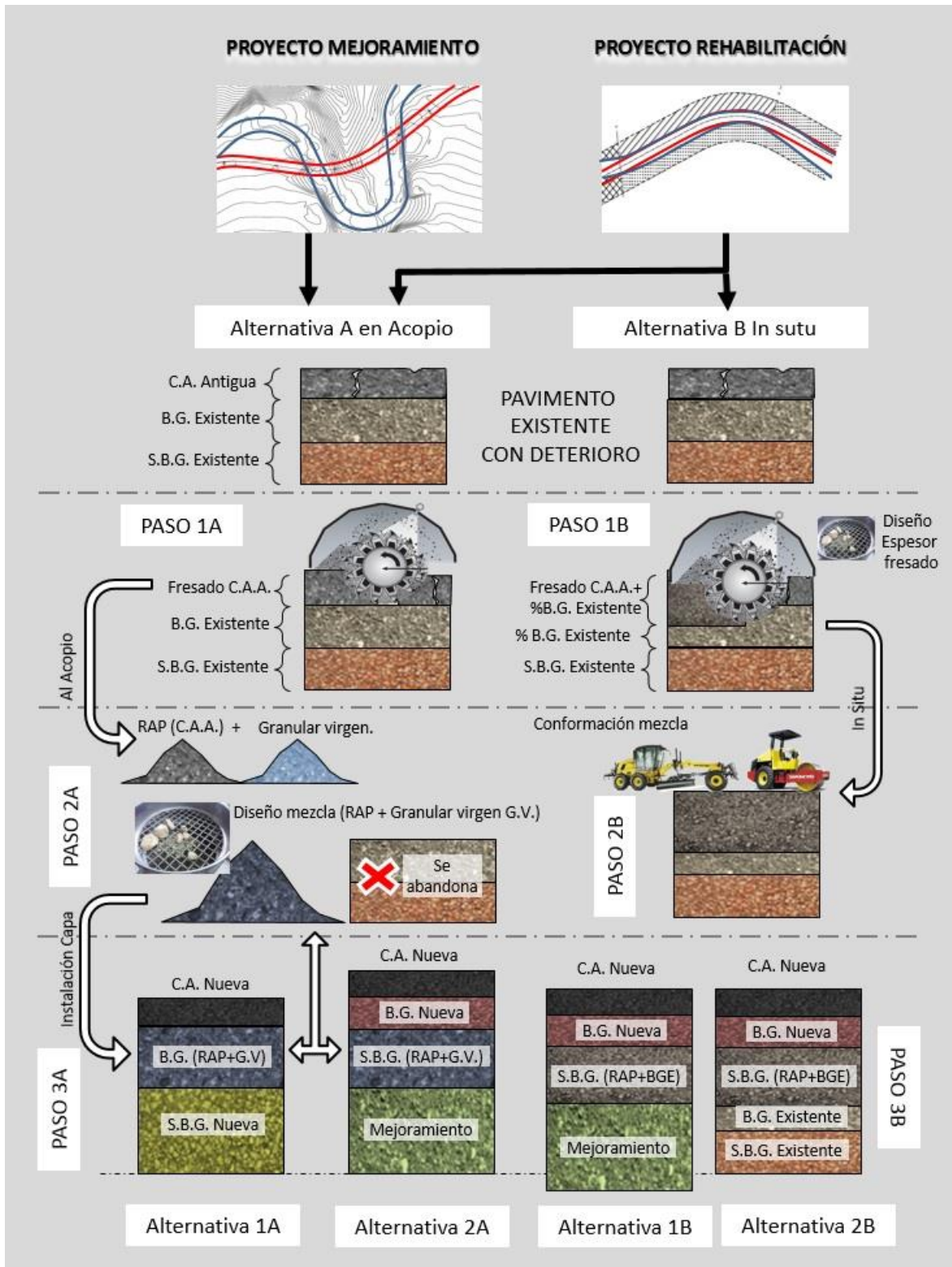
Para identificar la metodología de campo que determine el aporte estructural de capas granulares de base y sub-base elaboradas a partir de la reutilización del RAP es preciso establecer las posibles alternativas del uso del RAP en las intervenciones de los procesos de rehabilitación o

mejoramiento de carreteras o caminos existentes, teniendo como premisa la disponibilidad de insumo principal “El RAP” y la necesidad o previsión de poder reutilizarlo en las capas de base o sub-base granular.

Partiendo de ello, se identifican dos (2) condiciones del segmento de carretera donde se va a aplicar el proceso:

- Que la carretera tenga un diseño geométrico de intervención de tipo “Mejoramiento” del trazado; entonces en ésta se pronostica que las capas inferiores del pavimento no servirán para la futura estructura del pavimento y solamente de ésta se pueda disponer la capa asfáltica deteriorada mediante un proceso de fresado que permita su recolección para llevar a un acopio para su adecuación y su consecuente reutilización.
- Que la carretera prevea un diseño geométrico ceñido o casi ceñido al trazado existente en planta y se prevea que las capas inferiores del pavimento existente aporten estructuralmente a la nueva estructura del pavimento; en tal razón, se pueda prever el uso, no solo del material pulverizado de la capa asfáltica deteriorada, sino también de la capa granular adyacente, dejando la posibilidad de que éste se mezcle con el material fresado de la capa asfáltica para disponer de un material compuesto en desarrollo de un proceso In-situ. Por otra parte es preciso decir que en esta condición geométrica también se aplica el proceso de fresar únicamente la capa asfáltica para acondicionar el material en un acopio.

Por lo expuesto, el proceso se puede llevar a cabo en dos (2) escenarios: In-situ o en un acopio de acondicionamiento, como se observa en la Gráfica No 2.9 “Alternativas de reutilización del RAP como capas de base o sub base granular.”, lo cual se describe a continuación para posteriormente extraer de ello la metodología prevista para cada caso en particular.



Grafica No 6. Alternativas de reutilización del RAP como capas de base o sub base granular.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.1 Alternativa A. Reutilización del RAP en acopio o sitio de acondicionamiento.

Previstas las condiciones del proyecto donde se requiere reutilizar el material RAP, bien sea en el caso de proyectos de mejoramiento, construcción o rehabilitación de carreteras donde el material a reutilizar se lo quiera disponer para capas de base o sub-base granular se requiere realizar como mínimo el siguiente proceso:

➤ **Paso 1 A:** Pulverización de la capa asfáltica existente:

Para tal efecto, es necesario contar con una maquina fresadora, la cual permita extraer el RAP de la capa asfáltica deteriorada de una manera uniforme conforme a lo establecido en la normatividad para dicho trabajo; aunque es factible también disponer el RAP sin pulverizar y poder hacerlo en una planta de trituración, lo cual puede llevar a costos adicionales que no permita finalmente el ahorro esperado.

Como se observa en la Gráfica No 6, en aras de reutilizar el material granular de la capa asfáltica el espesor puede ser total o parcial según sea la necesidad o posibilidad.

➤ **Paso 2 A:** Acondicionamiento granulométrico y caracterización del material:

Una vez dispuesto el material RAP con las partículas totalmente disgregadas, a éste material se lo deberá analizar, primeramente, respecto a las condiciones establecidas en las especificaciones para Base o Sub-base granular según sea el objetivo.

De las propiedades expuestas en su caracterización y previendo que las principales que determinen su dureza, durabilidad y limpieza, se evaluará seguidamente la granulometría, con la cual se analizará las deficiencias que el material RAP tenga en cuanto a los tamaños que conformen una granulometría continua y bien gradada conforme al uso granulométrico que se ajuste para el tipo de capa objetivo.

Disponiendo el análisis granulométrico, se debe prever disponer seguramente materiales llenantes (arenas finas o gruesas) que ha de requerir el compuesto con RAP para cumplir su ensamble al uso granulométrico seleccionado, teniendo que disponer de un “material virgen” para su mezcla, la cual deberá diseñarse para cada lote característico del tramo a intervenir.

Para su caracterización completa, se deberá evaluar la resistencia mediante el ensayo de CBR para material granular y de ello también obtener la densidad máxima y humedad óptima para su aplicación en la instalación.

Una vez diseñado la mezcla (RAP+Granular Virgen G.V.) se deberá proceder a homogenizarlo con equipos mecánicos que garanticen su desarrollo y conveniente preservación.

➤ **Paso 3 A:** Diseño estructural e Instalación de la capa RAP + Granular virgen como Base o Sub-base granular:

De acuerdo a la normatividad disponible de base o sub-base granular, es prioritario proceder a realizar un tramo de prueba, el cual tendrá como propósito definir además de las condiciones de construcción, determinar la resistencia in-situ mediante ensayos de deflectometría y proceso de retrocálculo para disponer la resistencia de diseño que asegure el aporte estructural evaluándose la condición de esfuerzos para su determinación.

Previéndose seguramente un diseño preliminar de la estructura del pavimento, con la información obtenida de resistencia de la capa especial de RAP + Material Virgen, se debe proceder a realizar el ajuste de los espesores de la estructura del pavimento, esperando de ello que como mínimo se prevea el mismo espesor de la capa del granular originalmente previsto.

6.1.2 Alternativa B. Reutilización del RAP in-situ.

En condiciones de proyectos rehabilitación donde la rasante y geometría se conserva, se espera que el material RAP a reutilizar se lo quiera aprovechar en el mismo sitio, pero por las condiciones normales de gradación del RAP, es conveniente mezclarlo con otro material para disponer de una gradación continua y bien gradada, para ello es necesario prever realizar un fresado adicional de la capa granular adyacente, con objeto de que el material mezclado califique como capa de sub-base granular y dependiendo de la calidad de dicha capa adyacente, el material también pudiese calificar como base granular si así se obtuvieran los resultados de caracterización del material compuesto. Como se puede observar en la Gráfica No 6, esta alternativa podría proceder de la siguiente manera:

➤ **Paso 1 B:** Pulverización de la capa asfáltica existente y granular adyacente:

Como se observa en la Gráfica No 6, para esta alternativa es ideal disponer de muestras de fresado de la carpeta deteriorada y muestras de la capa granular adyacente para definir el diseño de la proporción de espesor a fresar, determinándose así el diseño de la mezcla, la cual determinará el porcentaje de cada capa y por ende el espesor.

En esta etapa de diseño, es procedente caracterizar la mezcla de estos materiales para efecto de evaluar las condiciones establecidas en las especificaciones para Base o Sub-base granular según se observen los resultados.

De las propiedades expuestas en su caracterización entre éstas, su dureza, durabilidad y limpieza se requiere tomar muestras para determinar la humedad óptima y densidad máxima, además de su evaluación de resistencia mediante ensayos de CBR para material granular.

Definidos todos estos aspectos, se procederá a fresar los materiales en los espesores previstos, controlándose sus dimensiones para disponer de un material compuesto uniforme.

Para tal efecto, es necesario realizar un tramo de prueba para proceder a evaluar todos los pasos previstos en esta alternativa.

➤ **Paso 2 B:** Conformación y compactación de la capa :

Como uno de los objetivos claros e importantes al utilizar esta metodología está en poder acondicionar la rasante y elevaciones a las condiciones propias del nuevo proyecto geométrico, lográndose con el material suelto conformarse de tal manera que se distribuya homogéneamente y permitiéndose con ello que las nuevas capas se puedan instalar con celeridad, porque no tendría que afectarse la subrasante.

De acuerdo a la normatividad disponible de base o sub-base granular, en el tramo de prueba, se requiere determinar la resistencia in-situ mediante ensayos de deflectometría y proceso de retrocálculo para disponer la resistencia de diseño que asegure el aporte estructural evaluándose las condiciones de esfuerzo para su determinación.

Por lo tanto, procede realizar la conformación y compactación según el ensayo proctor modificado, garantizando la mayor densidad posible del material compuesto.

➤ **Paso 2 B:** Conformación y compactación de la capa:

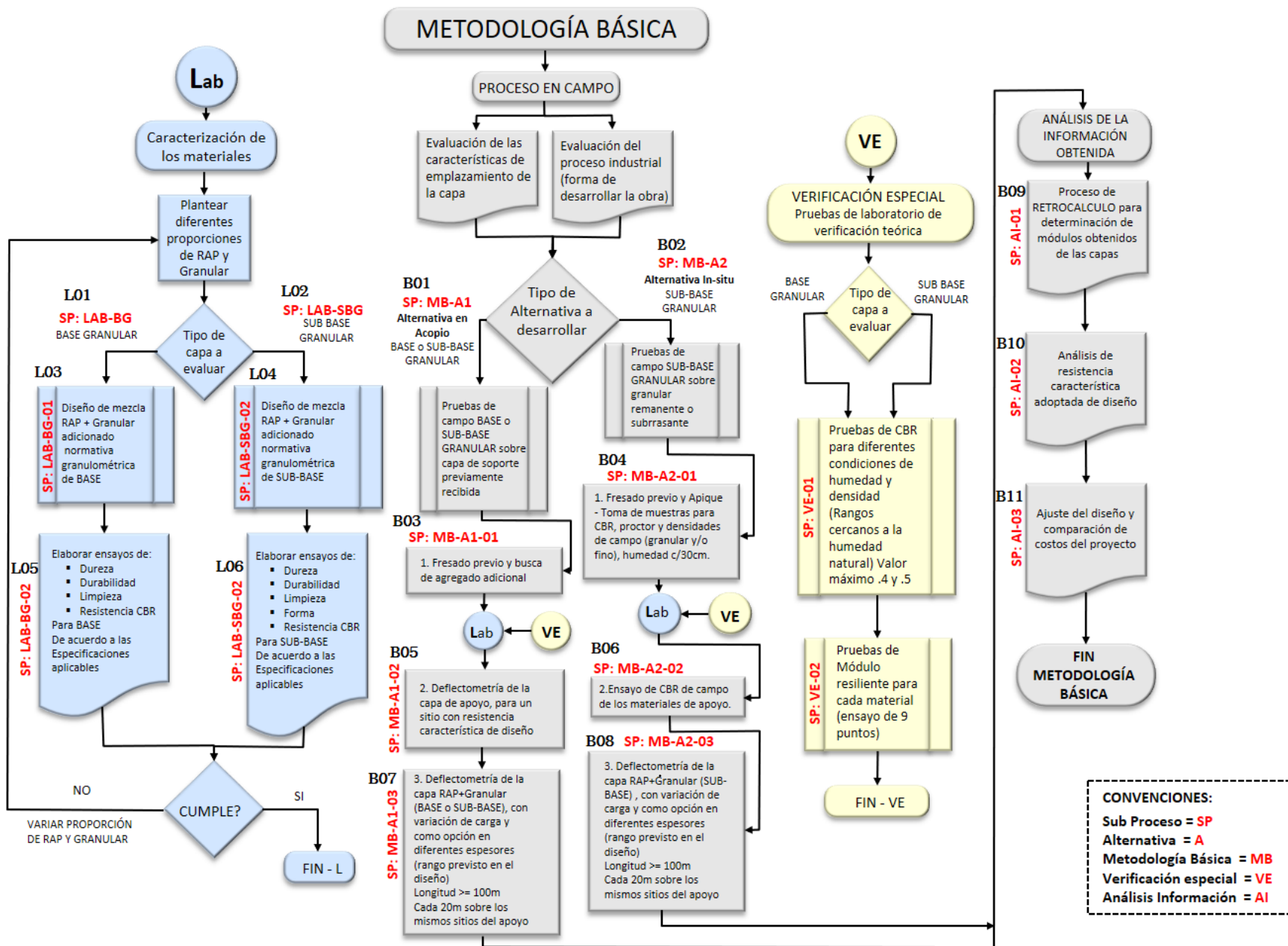
Previéndose seguramente un diseño preliminar de la estructura del pavimento, con la información obtenida de resistencia de la capa especial de RAP + Base Granular Existente (BGE), se debe proceder a realizar el ajuste de los espesores de la estructura del pavimento, esperando de ello que como mínimo se prevea el mismo espesor de la capa del granular originalmente previsto, bien sea de base o sub-base granular, lográndose con ello la reducción considerable de costos de intervención.

6.2 Metodología básica para reutilizar el RAP como insumo de capas de Base y Sub-base granular.

Como se observó anteriormente, el proceso de las posibles alternativas para utilizar el RAP como insumo de capas de base y sub-base granular, no requiere en campo (zona del proyecto) mayores tecnologías que las que normalmente utilizadas en proyectos de construcción de carreteras, pero es necesario disgregar los procesos mencionados para definir una metodología; así mismo, se requiere adicionar aspectos de verificación como ensayos alternos de evaluación de resistencia (Modulo resiliente), cuando las cantidades a aprovechar de RAP sean considerables.

En la Gráfica No 7 expuesta a continuación, se presenta la metodología básica para reutilizar el RAP como insumo de capas de Base y Sub-base granular; al respecto, obsérvese que, de los procesos descritos en las alternativas mencionadas, se ha extraído el contexto de pruebas de campo o laboratorio básicas para realizar la determinación de la resistencia del material compuesto (RAP + Granular adicional), requerida para determinar el aporte estructural en el diseño del pavimento.

METODOLOGÍA DE CAMPO PARA DETERMINAR EL APORTE ESTRUCTURAL DE CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUB-BASE ELABORADAS A PARTIR DE LA REUTILIZACIÓN DEL RAP



Grafica No 7. Metodología básica para reutilizar el RAP como insumo de capas de Base y Sub-base granular.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Gráfica No 7, para efecto de realizar un control de la documentación de soporte de la metodología, se propone una serie de listas de chequeo o fichas de registro de los cuatro (4) procesos principales con sus correspondientes códigos para identificación y trazabilidad así:

- SP-MB: Metodología básica de campo, con código de orden “B”.
- SP-LAB: Proceso de laboratorio - caracterización y diseño de mezcla, con código de orden “L”.
- SP-VE: Pruebas de verificación especial de laboratorio, con código de orden “V”.
- SP-AI: Subactividades de análisis de información, con código de orden asignado “B”, igual a la metodología básica por correspondencia y continuidad.

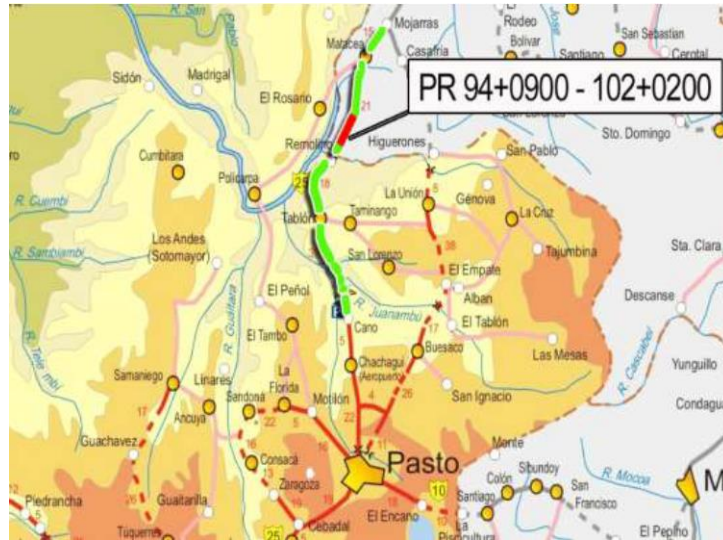
Por lo expuesto, en el presente trabajo se desarrolló en detalle todas las fichas identificadas en la Gráfica No 7 presentadas en el Anexo No 1 “*FICHAS PROPUESTAS PARA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA – (Explicación detallada de los sub-procesos y modelo de fichas)*”, explicándose previamente su objeto, alcance y resultado esperado con base en los conceptos tratados y otros de detalle técnico para cada uno de los subprocesos planteados, siguiendo el flujo de la metodología, con el fin que la actividad de reutilizar el RAP se desarrolle tanto en las posibles alternativas de intervención In-situ o en Acopio como en las dos (2) posibilidad de reutilización, esto es, para base o sub-base granular, para efecto de finalmente determinar el aporte estructura que brinda el material y el efecto del mismo en el diseño de la estructura del pavimento y la economía obtenida.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En aras de sustentar el funcionamiento de la metodología propuesta, en el presente capítulo se expone la aplicación de cada sub-proceso a un proyecto específico donde se realizó la implementación de una capa de granular cuyo insumo involucró la reutilización del RAP.

Conforme a lo expuesto en la parte introductorio del presente trabajo, conseguir un proyecto que haya adoptado formalmente el proceso de reutilización del RAP fue realmente difícil, no obstante se presentó la oportunidad entre los Departamentos de Nariño y Cauca, donde el INVIAS en continuidad del mejoramiento vial del corredor Pasto – Mojarras está pretendiendo restablecer la transitabilidad del sector Cano – Mojarras, PR 36 al PR 125 (2502), con una longitud de 88.56 Km, cuyo tramo en gran parte de su longitud presenta un alto deterioro de la estructura del pavimento y que en anteriores intervenciones promovió la reutilización del RAP, por efecto de las grandes distancias hacia las fuentes de materiales cercanas a la zona.

Actualmente, uno de los sectores críticos del corredor corresponde al PR 94+0900 al PR 102+0200, donde con una fracción de recursos inició el 11 de septiembre de 2017 el contrato de Obra No. 00889 de 2017, cuyo objeto fue: "Mantenimiento y rehabilitación de la carretera San Juan de Pasto - Mojarras sector Cano Mojarras Ruta 25 Tramo 2502, departamento de Nariño"; en este contrato además de restituir sectores críticos por inestabilidad geotécnica, se enfocaron también a continuar con la recuperación del pavimento del mencionado sector crítico, avanzando con el sector PR94+900 al PR95+900, y se realizó la rehabilitación del pavimento, aplicándose la metodología propuesta en el presente trabajo.



Grafica No 8. Localización del Sector Cano - Mojarras, Ruta 25, Tramo 02.

Fuente: Anexo Técnico, Licitación Pública LP-DO-SRN-029-2017, Pág. 2.

Conforme a la metodología propuesta, a continuación, se presenta el resumen de la aplicación de cada sub-proceso, el cual en forma detallada se expone en el Anexo No 2 del presente trabajo, para tal efecto, se enfocará en exponer los resultados más relevantes que involucró realizar la reutilización del RAP.

7.1 B02, SP-MB-A2: Evaluación de emplazamiento de la capa y del proceso industrial – proyecto de rehabilitación.

Conforme al diseño geométrico de la intervención donde se conserva el 100% del trazado en planta y condiciones de diseño vertical, el proyecto procedió a reutilizar el RAP en el mismo sitio, así se planteó en el diseño del pavimento presentado por el Contratista y aprobado por el Interventor.

Se destaca que la estructura del pavimento presentaba un altísimo deterioro como se observa en el resumen expuesto en la Gráfica No 9.

METODOLOGÍA DE CAMPO PARA DETERMINAR EL APORTE ESTRUCTURAL DE CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUB-BASE ELABORADAS A PARTIR DE LA REUTILIZACIÓN DEL RAP

1) Evaluación de condiciones del proyecto geométrico del proyecto :

Se evalúa geométricamente la posibilidad de aprovechar el RAP como material para aprovechamiento en función de su emplazamiento:

CARACTERÍSTICA DEL TRAZADO	% DESECCIÓN	SE CONSERVA DISEÑO EXISTENTE?	EL TRAZADO NUEVO ESTA CERCA DEL EXISTENTE?	PROPORCIÓN DEL ANCHO DE CALZADA NUEVA VS ANTIGUA?	SE REQUIERE FRESAR LA CAPA ASFÁLTICA?	VIABLE UTILIZAR RAP EN ACOPIO O IN SITU?
Diseño en planta Vs Geometría existente	70	SI, 100%	SI, se tiene acceso 100%	100%	SI, Se establece en el contrato la actividad.	Económicamente es viable en acopio o utilizar In situ.
Diseño vertical Vs Geometría existente	30	NO, 100%	Se elevará la rasante, Si se puede utilizar directo, 100%	N.A.		

2) Evaluación de condiciones del pavimento existente :

Se evalúa la posibilidad de aprovechar el RAP como material para aprovechamiento en función del estado del pavimento existente:

CARACTERÍSTICA DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO EXISTENTE	% IMPORTANCIA	ESPESOR DISPONIBLE	GRADO DE DETERIORO	HISTORIAL DE LA ÚLTIMA INTERVENCIÓN	CARACTERÍSTICA DE LOS AGREGADOS	VIABLE UTILIZAR RAP EN ACOPIO O IN SITU?
CARPETA ASFÁLTICA	80	15 cm	Fisuración PC y deformaciones por bacheos, 80%.	Se construyó hace 13 años de forma continua.	De aceptable calidad, Especificaciones INVIAS MDC-2 -1998.	Por las deficiencias de pavimento existente se prevé variabilidad del material. Preferiblemente in situ, por menores costos y como Sub-base
GRANULARES	20	40 cm	Se prevé contaminación de los granulados	Se construyó hace 13 años de forma continua	Deficiente, Partículas redondeadas.	

Nota: La condición superficial del pavimento por su alto deterioro y previsible variedad de espesor por sobre parcheos, se prevé que el fresado disponga deficiencias y considerable variabilidad que solo permita usarse en una actividad menos exigente como la sub-base granular.

Grafica No 9. Evaluación de la geometría y estado del pavimento del proyecto de aplicación.

Fuente: Elaboración propia – Anexo 2 del presente documento.

Respecto a la evaluación económica sobre la reutilización del RAP se observó que éste resultaba más económico que traer materiales de una fuente localizada en Galindez PR 111 (2502) a 61.5 Km de la obra, prácticamente con el sobrecosto determinado en el transporte del material.

Conforme a las ventajas y disponiéndose dentro del contrato el precio unitario y su especificación, el proyecto procedió a formular el diseño con la especificación particular.

ESPECIFICACIÓN PARTICULAR 320.1P

320.1P SUB-BASE GRANULAR CLASE A. CON MATERIAL DE RAP

Permanece vigente lo estipulado en la especificación general 320 DISPOSICIONES GENERALES PARA LA EJECUCIÓN DE AFIRMADOS, SUBBASES Y BASES GRANULARES ESTABILIZADAS y 320.1 SUBBASE GRANULAR excepto en los siguientes aspectos:

320.2 MATERIALES

Se utilizará como agregados el producto de la pulverización del pavimento proveniente del ítem Fresado de pavimento (RAP) en el espesor indicado en el proyecto y ajustado por el interventor cuando corresponda cumpliendo con la granulometría especificada. En el caso que se requiera material pétreo de adición se deberá adicionar cumpliendo lo estipulado en la especificación general 320 SUB-BASE GRANULAR

FORMA DE PAGO

Rige lo descrito en el numeral 320 y en particular en el 300.7 del artículo 300, sin incluir en el precio unitario el suministro del material pétreo producto de la pulverización del pavimento (RAP).

ÍTEM DE PAGO

320.1P Sub-base granular clase A. Con material de RAP Metro cúbico
(m³)

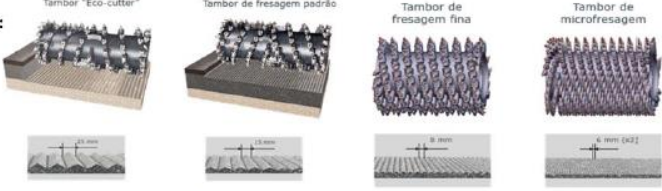
Grafica No 10. Especificación particular de Sub-base granular con RAP.

Fuente: Anexo Técnico, Licitación Pública LP-DO-SRN-029-2017, Pág. 8.

7.2 B04, SP-MB-A1-02 Desarrollo Prueba piloto fresado y recomendación agregado adicional.

Aplicándose la metodología se evaluó las características del material proveniente del pavimento existente, resumiéndose en la ficha su evaluación, véase Gráfica No 11.

1.1 Fresadora disponible: W100 WIRTGEN Ancho de fresado: 1000 mm Profundidad fresado : 0 - 300mm Picas: 100 Und

Tambor de fresado: 

Tipo de Pica y estado: Concreto X: Buena Asfalto

X - Diam. 930mm

1.2 Condiciones del pavimento existente :

Se evalúa las condiciones del fresado según la máquina y las características del pavimento existente:

CONDICIONES DE FRESADO EN LA CARPETA	ESPESOR DISPONIBLE Vs CAPACIDAD EQUIPO	GRADO DE DETERIORIO	EFEECTO EN LOS COSTOS Y/O RENDIMIENTO	EFEECTO EN EL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DEL RAP	REPORTE DEL FRESADO OBTENIDO EN PRUEBAS	VENTAJAS (V:) Y DESVENTAJAS (D:)?
CARPETA ASFALTICA - UNA UNICA PASADA?	15 cm / Apto	Fisuración PC y deformaciones, 70%. Fisuración > 3 mm, algunos desprendimientos.	En el costo No, el valor se paga por m3. Si se incrementa el rendimiento	Teniendo en cuenta que el material está con alta fisuración de considerable espesor, la gradación se afecta considerablemente. Se espera material grueso.	Gradación abierta, con considerable cantidad de partículas conglomerados sin pulverizar	V: Mayor rendimiento. D: La gradación obtenida se ve afectada por conglomerados
CARPETA ASFALTICA - DOS PASADAS?	Cada 7.5 cm / Apto		En el costo No, el valor se paga por m3. Si se disminuye el rendimiento y transporte	No se evaluó este proceso, lastimosamente no se recibió instrucción	Se hubiese presentado una gradación cerrada, sin sobretamaños	V: Se acondicionan las partículas a la gradación requerida. D: Menor rendimiento

2) Evaluación de los materiales disponibles y sus costos :

Se evalúa las condiciones del material disponible para la adición al RAP:

ORIGEN DE LOS MATERIALES	COSTO \$(/M3)	COSTO DE TRANSPORTE \$/(m3/Obra)	ES POSIBLE QUE EN PLANTA SE ACONDICIONE GRADACIÓN	DISPONIBILIDAD	CARACTERISTICAS DE LA PLANTA EN CUANTO A OPERACIÓN ADECUADA Y CUMPLIMIENTO
BASE GRANULAR SBG-50 - Fuente X	44,760	61,500	Si, puede volverse mas fina o mas gruesa	Suficiente disponibilidad	Aceptable
BASE GRANULAR SBG-38 - Fuente X	48,760	61,500	Si, puede volverse mas fina o mas gruesa	Con dificultad, material de poca salida.	Aceptable

Gráfica No 11. Aparte de la Ficha SP: MB-A2-01

Fuente: Elaboración propia – Anexo 2 del presente documento.

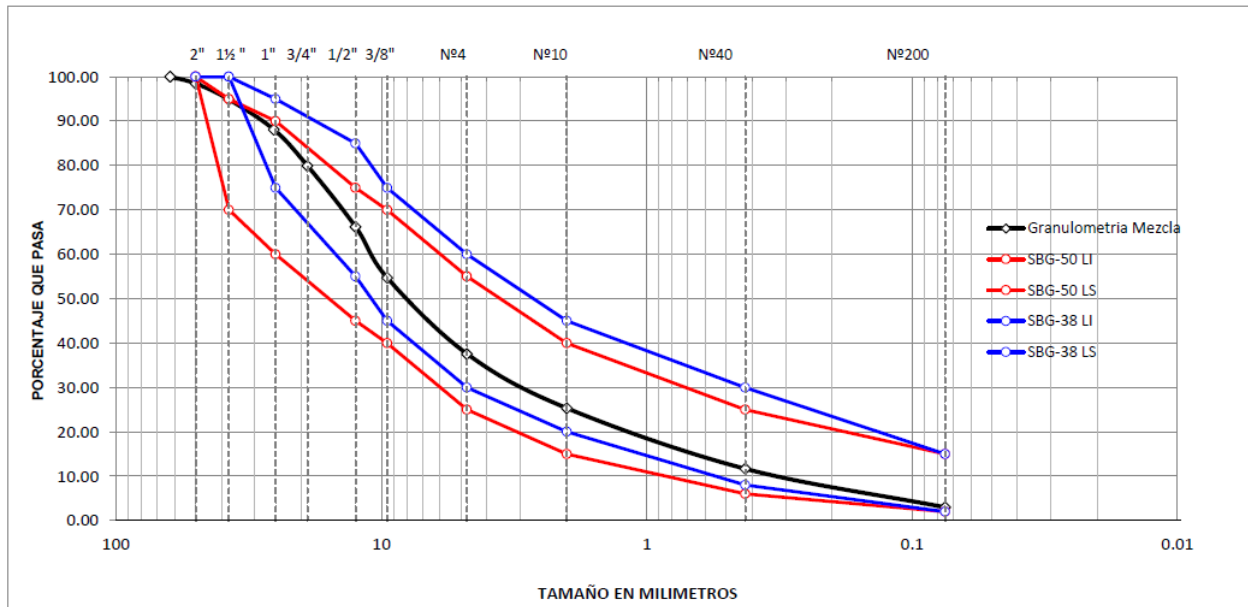
Como conclusión del proyecto se establece que se utilizaría como material adicionado el disponible en la Fuente Galindez, tipo SBG-50 para la mezcla con el RAP y se procede a remitir muestras al laboratorio para diseño de gradación y caracterización.

7.3 L02, SP: LAB-SBG: Identificación y resultados de caracterización en laboratorio para para sub-base granular.

Como prosigue, conforme a los sub-procesos L04, SP: LAB-SBG-01 de diseño de mezcla y L06, SP: LAB-SBG-02 se encuentra que basado en la gradación y caracterización de los materiales, la mezcla RAP en 60% y SBG-50 en 40% resulta más conveniente por que cumple los requisitos previstos en las Especificaciones Generales del INVIAS.

7.4 L04, SP: LAB-SBG-01: Diseño de mezcla para sub-base granular.

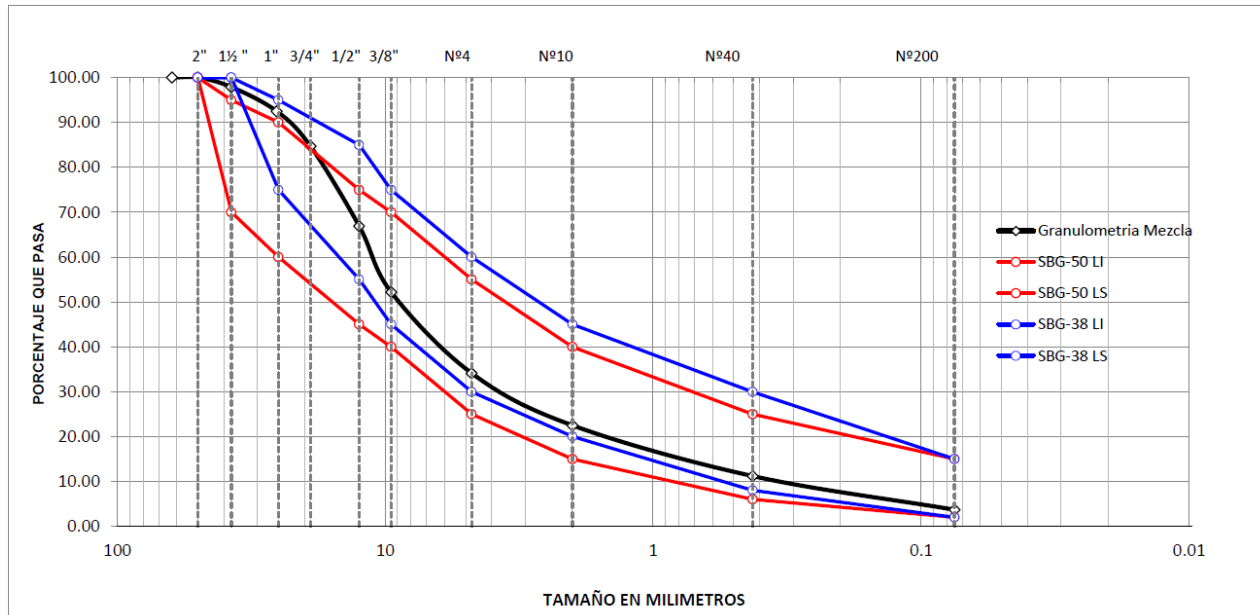
Para el desarrollo de este sub-proceso se desarrollaron tres (3) mezclas: RAP en 70% y SBG-50 en 30%, RAP en 60% y SBG-50 en 40% y para su evaluación se observó únicamente el RAP, obteniéndose el mejor ajuste granulométrico en la mezcla RAP en 60% y SBG-50 en 40%.



Gráfica No. 12. Aparte del resultado de Gradación de la mezcla RAP60% y SBG-50 40%. SP:LAB-BG-01-01

Fuente: Elaboración propia – Anexo 2 del presente documento.

Para referencia de las características del RAP, en la Gráfica 13 se presenta la gradación obtenida en el proceso de fresado del pavimento antiguo; obsérvese la discontinuidad en la zona intermedia de la gradación y el exceso de gruesos del material RAP.



Gráfica No. 13. Parte del resultado de Gradación de la mezcla RAP100%. SP:LAB-SBG-01-03

Fuente: Elaboración propia – Anexo 2 del presente documento.

7.5 L06, SP: LAB-SBG-02: Caracterización de los materiales para para sub-base granular.

Como se observa en la Gráfica No 14, el material RAP cumplió casi en su totalidad los requisitos de las Especificaciones del INVIAS para Sub-base Granular, excepto la resistencia, la cual se resuelve con el ajuste granulométrico de la mezcla con el material adicionado.

CARACTERÍSTICA	REQUERIDO CLASE B	MATERIAL SBG-50	MATERIAL RAP	OBSERVACIONES
Dureza (O)				
Desgaste - maquina de los Angeles (Gradacion A), 500 rev.	< 50	31	26.8	Tanto la Sub-base granular de adición como el RAP disponen de una dureza adecuada.
Degradacion por abrasion en el equipo Micro-Deval	< 35	N.R.	14.1	
Durabilidad (O)				
Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, maximo (%)				Aunque no se dispone de resultado del ensayo de Solidez de la sub-base granular de adición, se ha informado que esta cumple con dicha característica. Es de anotar que el material RAP dispone de la durabilidad adecuada para capa de sub-base granular.
- Sulfato de sodio	< 12	N.R.	6.9	
- Sulfato de magnesio	< 18	N.R.	N.R.	
Limpieza (F)				
Limite liquido, maximo (%)	< 25	NL	NL	En general tanto la sub-base granular para adición como el RAP disponen de la limpieza adecuada.
Indice de plasticidad, maximo (%)	< 6	NP	NP	
Equivalente de arena, minimo (%)	> 25	58	74	
Contenido de terrones de arcilla y particulas deleznales, maximo (%)	< 2	0.4	0	
Resistencia del material (F)				
CBR (%):	> 30	60	26.3	Al respecto se observa deficiencia del material RAP, principalmente influenciado por sus condiciones de gradación.

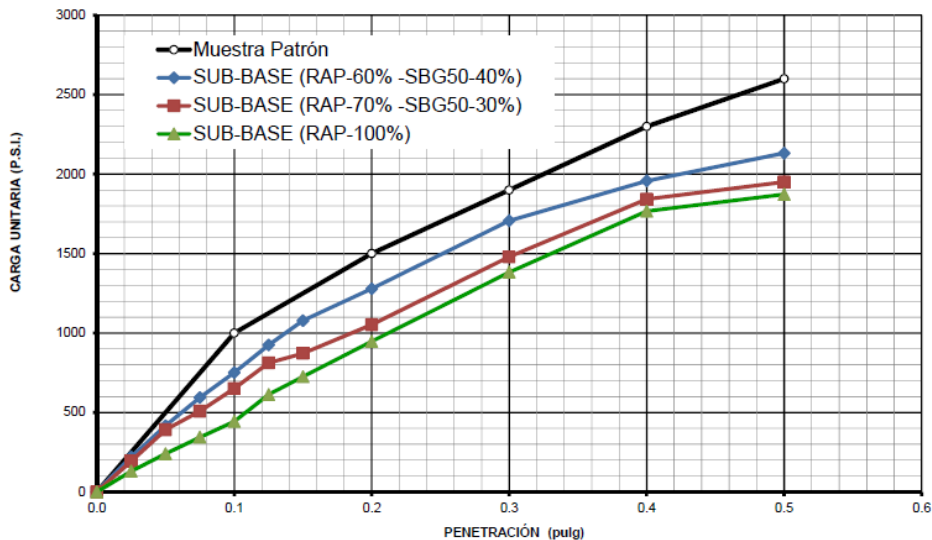
Gráfica No. 14. Parte del resultado de Caracterización del RAP y Granular adicionado. SP:LAB-SBG

Fuente: Elaboración propia – Anexo 2 del presente documento.

7.6 V01, SP: VE-01: Comparación de CBR para diferentes proporciones de RAP y material granular adicionado.

Conforme a la necesidad de evaluar las mezclas del RAP con el material adicionado en condiciones óptimas de humedad y densidad máxima se encontró que los materiales presentaron características adecuadas en cuanto a su comportamiento de resistencia en diferentes niveles de esfuerzo comparándose con los esfuerzos de la muestra patrón del ensayo original del CBR, al respecto obsérvese la Gráfica 15, donde los materiales presentan un cumplimiento para Sub-Base granular (CBR >30%) y casi se obtiene el CBR exigido para Base Granular (CBR>80%).

PENETRACION		MUESTRA PATRON		SUB-BASE (RAP-60% -SBG50-40%)				SUB-BASE (RAP-70% -SBG50-30%)				SUB-BASE (RAP-100%)			
		Esfuerzo		Carga	Esfuerzo		CBR	Carga	Esfuerzo		CBR	Carga	Esfuerzo		CBR
pulg.	mm	Kg/cm2	PSI	Kgf	Kg/cm2	PSI	%	Kgf	Kg/cm2	PSI	%	Kgf	Kg/cm2	PSI	%
0.000	0.000		0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	
0.025	0.064			298.3	15.4	219.0		263.5	13.6	193.4		176.6	9.1	129.4	
0.050	0.127			566.1	29.3	416.7		531.3	27.5	391.1		326.1	16.9	240.4	
0.075	0.191			809.6	41.8	594.5		691.3	35.7	507.8		468.7	24.2	344.2	
0.100	0.254	70.3	1000	1021.7	52.8	751.0	75.1	886.1	45.8	651.4	65.1	604.4	31.2	443.8	44.4
0.125	0.318			1258.2	65.0	924.5		1105.2	57.1	812.2		833.9	43.1	613.0	
0.150	0.381			1466.9	75.8	1078.1		1186.2	61.3	871.9		986.9	51.0	725.4	
0.200	0.508	105.5	1500	1739.5	89.9	1278.7	85.2	1431.9	74.0	1052.5	70.2	1289.5	66.6	947.3	63.2
0.300	0.762	133.6	1900	2321.8	120.0	1706.8	89.8	2012.3	104.0	1479.2	77.9	1880.7	97.2	1382.5	72.8
0.400	1.016	161.7	2300	2662.3	137.6	1957.1	85.1	2505.6	129.5	1841.9	80.1	2402.4	124.2	1766.5	76.8
0.500	1.270	182.8	2600	2900.3	149.9	2132.1	82.0	2652.7	137.1	1950.0	75.0	2548.5	131.7	1873.2	72.0
				Peso Unitario: 2.193 g/cm3				Peso Unitario: 2.084 g/cm3				Peso Unitario: 2.074 g/cm3			
				Humedad optima: 6.1%				Humedad optima: 6.2%				Humedad optima: 6.1%			



Gráfica No 15. Aparte del resultado de evaluación de Resistencia al CBR del RAP en las mezclas evaluadas. SP: VE-01

Fuente: Elaboración propia – Anexo 2 del presente documento.

7.7 V02, SP: VE-02: Evaluación de resistencia mediante el ensayo de Módulo Resiliente.

Se debe considerar que el proyecto por su reducida dimensión y condición de la capa granular a nivel de sub-base, no tuvo previsto realizar pruebas dinámicas; sin embargo, frente a los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta a continuación se contrasta el resultado de la metodología implementada referido a la ecuación de Modulo Resiliente de la mezcla RAP60% - SBG50 40% presentada en la Grafica No 38 versus el estudio realizado por el Departamento de Transporte de Minnesota, Estados Unidos, desarrolló en 2007, donde se desarrollaron pruebas dinámicas de Mr mediante el protocolo de prueba 1-28A a diferentes combinaciones de materiales de RAP y granulares de aporte (%RAP/agregado adicional: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25), variándose las condiciones de humedad y densidad para cada mezcla, presentado en la Tabla No 1 del Anexo 1 (Pág. 23) del presente documento; obsérvese en la Grafica No 16 la adecuada consistencia de los datos.

MN/RC-2007-05 - Minnesota Department of Transportation				
ID	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	$MR = K_1 * \theta^{K_2}$		
		k_1	k_2	R^2
S_5.1	CR 3_Blend_65	4764	0.50	0.97
S_7.8	CR 3_Blend_100	3903	0.50	0.97
T_5.7	CR 3_100%A_65	3895	0.50	0.98
T_8.8	CR 3_100%A_100	3112	0.50	0.97
U_5.7	CR 3_75%A-25%R_65	4697	0.50	0.99
U_8.7	CR 3_75%A-25%R_100	3122	0.50	0.95
V_5.2	CR 3_50%A-50%R_65	4657	0.50	1.00
V_8	CR 3_50%A-50%R_100	3481	0.50	0.91
W_4.7	CR 3_25%A-75%R_65	6009	0.50	0.99
W_7.2	CR 3_25%A-75%R_100	4515	0.50	0.97
X_3.5	TH 23_Blend_65	4334	0.50	0.99
X_5.4	TH 23_Blend_100	3934	0.50	0.98
Y_3.7	TH 200_Blend_65	4739	0.50	0.97
Y_5.7	TH 200_Blend_100	3804	0.50	0.92

Resultado de la ecuación obtenida en el proyecto específico
 RAP60% - SBG50 40%

$K_1 = 26.504 \text{ Kpa}$
 26.5 Mpa
3.844 PSI

$K_2 = \underline{0.5}$

$MR = 3.844 * \theta^{0.5}$

Grafica No 16. Comparación de K1, K2 obtenidos en el estudio realizado por la Universidad de Minnesota y los obtenidos en el Proyecto Especifico

Fuente: Elaboración propia y (Kim & Labuz, 2007, pág. 56).

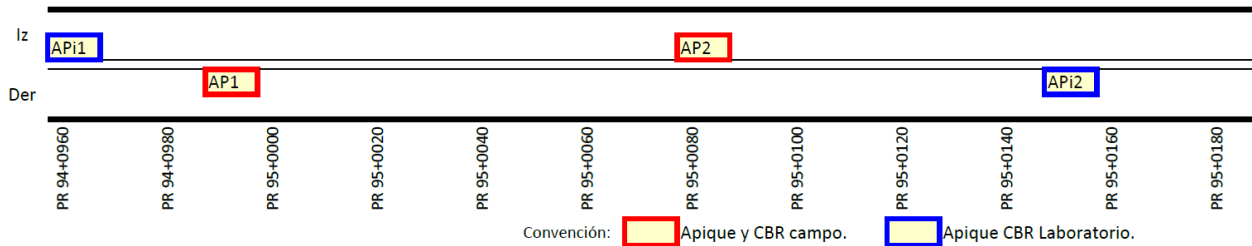
7.8 B06, SP: MB-A2-02: Determinación de resistencia de capas de apoyo -CBR.

Considerándose que el proyecto específico involucra la alternativa de rehabilitación In-Situ, las pruebas realizadas se llevaron a cabo en el sector característico de acuerdo al diseño del pavimento, específicamente entre el PR 94+0900 al PR 95+0100, donde se concentraron las evaluaciones de las capas de apoyo mediante apiques, realizándose ensayos de CBR de campo.



Grafica No 17. Sector donde se desarrollaron las pruebas de resistencia, PR 94+0990, Vista Sur - Norte

Fuente: Elaboración propia.



Grafica No 18. Distribución de ensayos de resistencia a las capas de apoyo. SP:MB-A2-02

Fuente: Elaboración propia. Anexo 2

Como resultado de las pruebas se encontraron resultados acordes a los determinados en diseños preliminares hechos por el Proyecto, véase Gráfica No 19.

No	Abscisa	I o D	Plataforma evaluada		Compactación (% Proctor)	Humedad %	Clasificación			Subrasante		Capa de apoyo	
			Tipo de Material	Espesor (cm)			USC/AASHTO	LL	LP	CBR (%)	Referencia del dato	CBR (%)	Referencia del dato
Ai-1	PR 94+0960	I	Subrasante	N.A.	N.Dispone	18	SC	35.8	19	17.1	CBR Lab.	N.A.	
AP1	PR 94+0990	I	Base existente	25	95	5.6	SM	NL	NP			44.5	CBR Campo
			Subrasante	N.A.	Natural	10.2	SC	35.8	19	14.3	CBR Campo		
AP2	PR 95+0080	I	Base existente	30	95	5.2	SM	NL	NP			70.6	CBR Campo
			Subrasante	N.A.	N.Dispone	10.9	SC	35.7	20.8	20.6	CBR Campo		
Ai-2	PR 95+0150	I	Subrasante	N.A.	N.Dispone	6.7	SC	35.7	20.8	15.1	CBR Lab.	N.A.	

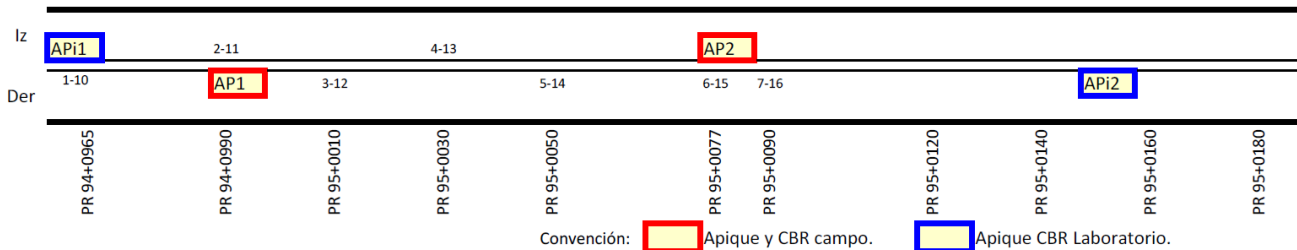
Nota: Los registros de CBR se procesan en formato auxiliar de campo SP: MB-A2-02-CBR y otros

Grafica No 19. Resultados de ensayos de resistencia de las capas de apoyo. SP:MB-A2-02.

Fuente: Elaboración propia. Anexo 2

7.9 B08, SP:MB-A2-03: Ensayos de deflectometría de la capa granular con RAP para la alternativa In-situ.

Conforme al sector localizado de resistencia característica, se realizaron 14 ensayos de viga Benkelman distribuidos aproximadamente cada 20m, en proximidad de los apiques de referencia, midiéndose ocho (8) en condiciones del eje estándar de 8.2 toneladas y ocho (8) en condiciones de carga de 3.5 toneladas (Volqueta descargada), éstos últimos para efecto de evaluar las diferencias de esfuerzos en la plataforma de apoyo y compuesto de capas de Granular con RAP, Granular Remanente (antigua base granular) y Subrasante como se observa en la Gráfica No 20, 21 y 22.



Grafica No 20. Localización de ensayos de Viga Benkelman Capa Granular con RAP. SP: MB-A2-03

Fuente: Elaboración propia. Anexo 2

METODOLOGÍA DE CAMPO PARA DETERMINAR EL APORTE ESTRUCTURAL DE CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUB-BASE ELABORADAS A PARTIR DE LA REUTILIZACIÓN DEL RAP



Grafica No 21. Calibración de la carga de la volqueta y ensayo de viga Benkelman

Fuente: Elaboración propia.

No	Abscisa	I o D	Capa superficial de la Plataforma evaluada		Compactación (% Proctor)	Humedad %	Condiciones de carga			Lectura Viga		Deflexión obtenida		
			Tipo de Material	Espesor (cm)			Carga (Ton.)	Presión Inflado (PSI)	Radio (m)	Lo	L25	Do	D25	RC (m)
1	PR 94+0965	I	RAP60%+SBG40%	25	95	2.14	8.2	80	10.8	24	5	819.1	194.9	50.06
10			RAP60%+SBG40%	25	95	2.14	3.6	80	7.1	8	3	273	116.9	200.2
2	PR 94+0990	D	RAP60%+SBG40%	25	95	2.14	8.2	80	10.8	14	2	477.8	77.94	78.15
11			RAP60%+SBG40%	25	95	2.14	3.6	80	7.1	7	1	238.9	38.97	156.3
3	PR 95+0010	I	RAP60%+SBG40%	25	95	2.14	8.2	80	10.8	16	2	546.1	77.94	66.75
12			RAP60%+SBG40%	25	95	2.14	3.6	80	7.1	11	2	375.4	77.94	105
4	PR 95+0030	D	RAP60%+SBG40%	25	95	2.14	8.2	80	10.8	22	9	750.9	350.7	78.1
13			RAP60%+SBG40%	25	95	2.14	3.6	80	7.1	14	3	477.8	116.9	86.59
5	PR 95+0050	I	RAP60%+SBG40%	25	95	3.8	8.2	80	10.8	18	6	614.3	233.8	82.12
14			RAP60%+SBG40%	25	95	3.8	3.6	80	7.1	12	3.5	409.6	136.4	114.4
6	PR 95+0077	D	RAP60%+SBG40%	25	95	3.8	8.2	80	10.8	14	2	477.8	77.94	78.15
15			RAP60%+SBG40%	25	95	3.8	3.6	80	7.1	7	3	238.9	116.9	256.1
7	PR 95+0090	I	RAP60%+SBG40%	25	95	3.8	8.2	80	10.8	11	6	375.4	233.8	220.7
16			RAP60%+SBG40%	25	95	3.8	3.6	80	7.1	6	1	204.8	38.97	188.5

Nota: La variación en la condición de esfuerzos se evalúa en el proceso previo al retrocálculo, para lo cual se debe verificar la proyección en el modelo estructural y realizar el análisis.

Grafica No 22. Resultado de ensayo de Viga Benkelman sobre material Granular con RAP. SP: MB-A2-03

Fuente: Elaboración propia. Anexo 2

7.10 B09, SP: AI-01: Recopilación de datos de resistencia de las capas y análisis de Retrocálculo.

Conforme al procedimiento de este sub-proceso planteado en el Numeral 11 del Anexo 1 del presente documento, se hizo la recopilación de los resultados de resistencia de las capas de apoyo (según el registro del subproceso B06, SP: MB-A2-02) y las deflexiones levantadas sobre la capa granular con RAP (según el registro del subproceso B08, SP:MB-A2-03); con esta información se procede a realizar los cálculos del Módulo Resiliente según los tres (3) métodos planteados en la metodología para los siete (7) puntos de concentración de los ensayos (7 cálculos) y dos (2) tipos de carga para el ensayo de viga benkelman, para un total de 14 ensayos:

- Por Teoría Bicapa – Burmister,
- Por Resultados Retrocálculo - Solo deflexiones y
- Por Resultados Retrocálculo – Deflexiones y Modulo resiliente de la subrrasante.

El registro de los cálculos se organizó en una tabla, donde se consigna el emplazamiento del punto evaluado, las condiciones de ensayo, los resultados de resistencia de las capas de apoyo, las deflexiones obtenidas y los cálculos de los tres (3) métodos. Véase Gráfica No 23.

Como se observa, para cada sitio de cálculo, se han limitado los campos para cada uno de los métodos de cálculo evaluados, consignándose para cada uno de ellos los resultados parciales y definitivos obtenidos del módulo del materia granular con RAP, denominado “E1” y en particular, para el módulo de la subrasante consignándose su valor obtenido como “MR cal”, determinado en dicho proceso y “MR” si fue obtenido a partir de la correlación con el ensayo de CBR desarrollado en el apique correspondiente.

Una vez determinado todos los valores de módulos obtenidos a partir de diferentes métodos y condiciones se tienen las siguientes conclusiones:

- a) Se procedió a evaluar la consistencia de resultados, observándose que los valores obtenidos en puntos donde no se dispuso en el mismo sitio la valoración de la resistencia de la subrasante y capa de apoyo de la capa a evaluar (RAP60%-SBG40%) se encontró que por la variabilidad de deflexiones obtenidas respecto a las deflexiones donde sí se disponían de los ensayos previos, éstas deflexiones inducían a valores aunque en rango aceptables para materiales de tipo sub-base, algo diferentes a los determinados donde se realizaron apiques; variación que se acredita principalmente a las capas subyacentes a la capa evaluada, en tal sentido, estos resultados se descartan como valores de módulo obtenido del modelo aplicado.
- b) En los puntos 2, 6 y 7 donde sí se disponían resultados directos de resistencia de las capas subyacentes, se observan datos muy parecidos del módulo “ E_1 ” obtenido entre las diferentes metodologías, con las cuales se obtuvieron los módulos de la capa objetivo, entonces se denota consistencia; pero, por efecto del resultado de resistencia alto obtenido en las capas subyacentes, los puntos 6 y 7 disponen valores altos del módulo “ E_1 ” calculado; además, siendo los resultados del módulo de la subrasante mayores a la resistencia característica del proyecto; por lo tanto, se descartan estos puntos 6 y 7.
- c) Se escoge entonces como información primaria y coherente, el punto evaluado en la zona del primer apique (el No 2). Ahora entonces, procede observar inicialmente, el análisis realizado por los diferentes métodos de cálculo, donde se denota que lo más real posible es el realizado por el método “*Resultados Retrocálculo – Deflexiones y Módulo resiliente de la subrasante*” observado en el numeral 11 del Anexo 1, considerando la resistencia obtenida en campo de las capas de apoyo fueron obtenidas directamente por ensayos de campo (CBR); por lo tanto la corrida de retrocálculo estos valores fueron asignados como fijos y únicamente se procedió a determinar el módulo de la capa objetivo – la capa granular con RAP. Nótese en la Gráfica No 24, que para el cálculo de dicho método, de cada carga de ensayo se determinaron dos (2)

- d) Ahora bien, definido el proceso más coherente con la información que se dispone (*Resultados Retrocalculo – Deflexiones y Modulo resiliente de la subrrasante*, Numeral 11 del Anexo 1), falta determinar cuál de los dos (2) resultados de módulo se escoge.

Para tal efecto, se debe valorar las condiciones de esfuerzo y deformaciones a las que estuvo sometida la capa granular con RAP; por lo tanto, se trasladó el modelo estructural de cada una de las condiciones en un software de diseño elástico, para el caso se utilizó WinJulea, donde se obtuvieron las curvas de esfuerzo y desplazamiento para cada caso, donde se encontró que en el modelo de carga de 3.5 ton, el 90% esfuerzo se concentró en la capa evaluada, en cambio en el modelo de carga de 8.2 ton el esfuerzo se disipó muy cerca de la subrrasante distribuyéndose prácticamente en todo el espesor del conjunto. Véase Gráfica No 25.

Inicialmente se debe recordar lo expuesto en el Numeral 11 del Anexo No 1, donde se estableció que la metodología adopta la premisa que: “*La presión de contacto es igual a la presión de los neumáticos*”, lo cual en la realidad no es necesariamente cierto, toda vez que la huella de los vehículos no es un círculo perfecto y la diferencia puede ser importante en algunos casos; no obstante, nótese en la Gráfica No 25 que el valor de área de carga determinada para el vehículo cargado con 8.2 ton es 36.643 mm² y el vehículo cargado con 3.5 ton es 15.640 mm², valor proporcional a la carga implementada.

Por lo expuesto, con este análisis se demuestra que para el caso específico, el módulo 4.127 Kg/cm² refleja la respuesta más coherente, determinado con el modelo de carga de la viga benkelman con carga de 3.5 toneladas, toda vez que se determina que en esa condición de espesores y módulos de la capa de apoyo, dicha carga es la ideal para determinar el modulo del material granular con RAP en el proceso de evaluación deflectométrica con viga benkelman y su posterior proceso de retrocalculo para este caso específico.

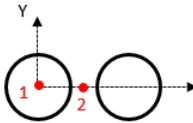
Modelo de carga Viga benkelman con 8.2 ton.

DATOS DE ENTRADA

	Modulo		Poisson (μ)	Ligada (1-sí, 0-no)	Espesor (mm)
	(Mpa)	Kg/cm ²			
RAP(60%)+SBG(40%)	341.5	3.482	0.45	0	250
Base antigua	239	2.437	0.45	0	250
Subrasante	97	989	0.45	0	0

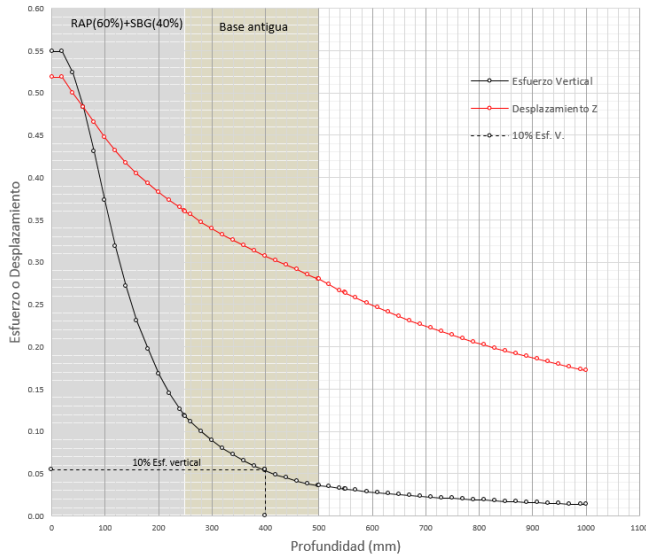
EJE SIMPLE RUEDA DOBLE 8.2 TON

Carga eje: **8.2** Ton P: **2050** Kg. Q: **80** PSI
 # Llantas: **2** a: **10.8** m Q: **5.6** Kg/cm²
 E. Est.: **50.0** cm A: **36,643** mm² ST: **32.4** cm



LOCALIZACION DE LAS CARGAS

No	X	Y
1	0.0	0.0
2	0.0	32.4



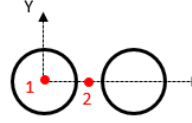
Modelo de carga Viga benkelman con 3.5 ton.

DATOS DE ENTRADA

	Modulo		Poisson (μ)	Ligada (1-sí, 0-no)	Espesor (mm)
	(Mpa)	Kg/cm ²			
RAP(60%)+SBG(40%)	404.7	4.127	0.45	0	250
Base antigua	239	2.437	0.45	0	250
Subrasante	97	989	0.45	0	0

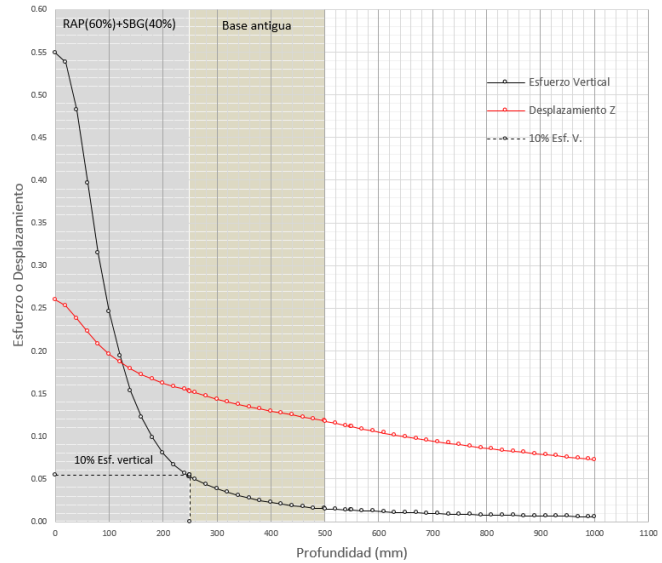
EJE SIMPLE RUEDA DOBLE 3.5 TON

Carga eje: **3.5** Ton P: **875** Kg. Q: **80** PSI
 # Llantas: **2** a: **7.1** m Q: **5.6** Kg/cm²
 E. Est.: **50.0** cm A: **15,640** mm² ST: **32.4** cm



LOCALIZACION DE LAS CARGAS

No	X	Y
1	0.0	0.0
2	0.0	32.4




Grafica No 25. Comparativo de diagrama de esfuerzos verticales entre dos (2) modelos de carga de la viga benkelman, de 8.2 ton. y 3.5 ton. - Proyecto específico.

Fuente: Elaboración propia. Anexo 2

7.11 B10, SP: AI-02: Análisis de resistencia característica adoptada para el diseño.

Conforme a la metodología expuesta en el Numeral 12 del Anexo 1, donde se presenta el sub proceso B10, SP: AI-02, en el reporte expuesto en la Grafica No 26, se presenta el análisis determinado del módulo de material granular con RAP en las condiciones del diseño, partiendo del valor de módulo resiliente obtenido en el proceso de retrocalculo y con base en la condición de esfuerzos del material en la estructura del pavimento, de donde se obtuvo los esfuerzos principales para el análisis final.

METODOLOGÍA DE CAMPO PARA DETERMINAR EL APORTE ESTRUCTURAL DE CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUB-BASE ELABORADAS A PARTIR DE LA REUTILIZACIÓN DEL RAP

	Proyecto de grado: METODOLOGÍA DE CAMPO PARA DETERMINAR EL APORTE ESTRUCTURAL DE CAPAS GRANULARES DE BASE Y SUB-BASE ELABORADAS A PARTIR DE LA REUTILIZACIÓN DEL RAP Autor: ANDRÉS RICARDO IBARRA ENRIQUEZ	Proyecto: Mantenimiento y rehabilitación de la carretera San Juan de Pasto- Mojarras sector Cano Mojarras Ruta 25 Tramo 2502, departamento de Nariño.	Alternativa: En acopio o In situ Fuentes: RAP: - PR 94+0960 al PR 97 (2502) Base Granular: Galindez PR 11	Formato: SP: MB-A2 Descripción: Análisis de resistencia característica adoptada para el diseño
---	---	---	--	---

ANÁLISIS DE RESISTENCIA CARACTERÍSTICA ADOPTADA PARA EL DISEÑO

Objeto: El presente reporte es la consignación del análisis de la resistencia característica de la capa granular con contenido de RAP con base a los datos obtenidos del proceso de retrocálculo, para lo cual se evalúa las condiciones del ensayo, las condiciones de esfuerzos y su proyección de resistencia para el diseño.

Para efecto de determinar el módulo a proyectar para el diseño se adopta el modelo del esfuerzo bulk o también conocido como modelo K-θ, el cual fue considerado el mejor procedimiento para la determinación del módulo resiliente de suelos granulares y fue propuesto por Seed y otros en 1967.

Donde:

$$MR = k_1 \theta^{k_2} \quad \text{Ecuación 1}$$

MR = Módulo resiliente del material granular a evaluar

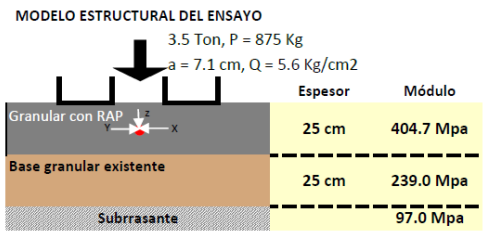
K1 y K2 son obtenidas experimentalmente y θ es la suma de los esfuerzos principales, el cual puede ser la suma de los tres esfuerzos normales, σx, σy y σz o la suma de los tres esfuerzos principales σ1, σ2 y σ3, donde K1 a determinarse con base al ensayo y K2 con base a experimentación de diferentes autores.

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

- Si fuese necesario ajustar el módulo obtenido en Retrocálculo por efecto de la Rigidez relativa de las capas asfálticas que puedan estar por encima del granular evaluado, entonces se tiene que considera su efecto de rigidez y tiempo de aplicación de la carga ; por lo tanto, considerándose que los ensayos se los realizó directamente sobre el granular, no procede el ajuste:

$$MR = MR_{vb} / 1.00 \Rightarrow MR = 404.7 \text{ Mpa} \times 1.00 = 405 \text{ Mpa} = 4127 \text{ Kg/cm}^2$$

- Determinar a partir del modelo elástico del ensayo de viga Beankeman con la carga del ensayo y módulo seleccionado los esfuerzos principales en la mitad de la capa, para lo cual con se somete el modelo a un software, para el caso WinJulea.



RESULTADO DE LOS ESFUERZOS

En h = 12.5 cm

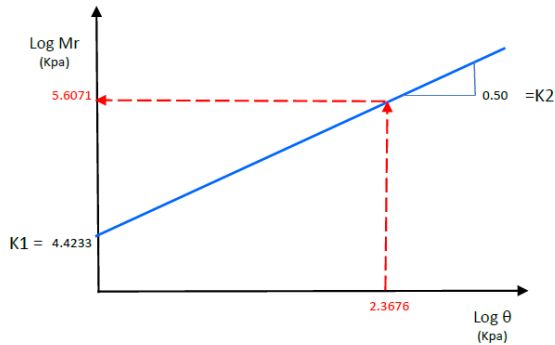
σ1 = 1.94E-01 Mpa =>	193.9
σ2 = 2.36E-02 Mpa =>	23.6
σ3 = 1.57E-02 Mpa =>	15.7

θ = σx + σy + σz => **233.2 Kpa**

- Teniendo en cuenta que en la grafica de la Ecuación 1, los valores de Módulo e invariante de esfuerzos se encuentran afectados por logaritmo determinando para el caso de granulares un comportamiento lineal en dicho sistema y teniendo en cuenta que el valor K2 es la pendiente, a continuación se determinan los valores de Mr y θ para esa condición así:

$$Mr = 404700.0 \text{ Kpa} \Rightarrow \text{Log} (404,700) = 5.6071$$

$$\theta = 233.2 \text{ Kpa} \Rightarrow \text{Log} (233.150) = 2.3676$$



- Considerando los valores recomendados para el comportamiento de bases y sub-bases, el valor de K2 se encuentra entre 0.5 y 0.7, para lo cual se adopta el valor de K2=0.6.

- Considerese que disponiendo K2, se dispone de la pendiente de la recta en la gráfica y con los valores de LogMr y Logθ se dispone de lo necesario para construir la ecuación de la recta en el sistema doblemente logaritmico.

De la teoría lineal:

Y - Y1 = m (X - X1), donde Y = LogMr y X = Log θ y los valores de Y1 y X1 son los determinados anteriormente entonces:

$$Y - 5.6071 = 0.5 (X - 2.3676)$$

Y = 0.5 X + 4.4233 => Si la variante de esfuerzos en la condición corte con el eje de LogMr de la gráfica es 0, entonces se despeja Mr así:

$$Y = 4.4233$$

Siendo Y = LogMr => LogMr = 4.4233, Despejando: Mr = 10^(4.4233) => Mr = 26,504.2 Kpa, para θ = 0

Ahora bien, obtenido los componentes de la Ecuación 1, ésta queda construida de la siguiente manera:

$$MR = 26,504 \times (\theta)^{0.50}$$

, Al aplicar la expresión con el valor de invariante esfuerzos en las condiciones de diseño se tiene que:

$$MR = 26504 \times (46.24)^{0.5} = 180,238 \text{ Kpa} \Rightarrow 180.2 \text{ Mpa} \quad 1,837.9 \text{ kg/cm}^2 \quad 26,141 \text{ PSI}$$

Conclusión:

Con el módulo obtenido se procede a utilizar el resultado en el modelo estructural del ajuste del diseño.

Grafica No 26. Análisis de la resistencia característica de la capa de Granular con RAP adoptada en el diseño con base en la metodología y condiciones de diseño del pavimento. Aplicación del proyecto específico.

Fuente: Elaboración propia. Anexo 2

Como se observa en la Gráfica No 26, el valor implementado de Invariante de esfuerzos Θ , del diseño correspondió a 46.2 Kpa⁴, valor mucho menor del obtenido en el modelo del ensayo de viga benkelman 233.2 Kpa y por tal efecto, el módulo se redujo conforme a la ecuación determinada hasta determinar un valor de 180.2 Mpa. (1.837 Kg/cm²), valor muy coherente con la condición de emplazamiento de la capa y conforme a los valores típicos de sub-base granular.

7.12 B11, SP: AI-03: Ajuste del diseño y comparación de costos.

En la Grafica No 27 se presentan las condiciones desarrolladas en los estudios y diseños del proyecto específico, donde se destaca lo siguiente:

- Variable clima: Se considera indispensable evaluar este aspecto que en contraste con las condiciones de la zona no corresponden con la realidad.
- Variable Tránsito: Aunque el análisis de crecimiento y determinación del TPD son válidos, es necesario ajustar y sustentar la determinación de la proyección del factor camión y determinación por espectro de carga de la variable tránsito.
- Módulos de los materiales: Además de la deficiencia en el efecto de la variable clima que afecta el módulo de la subrasante principalmente, se observa que es indispensable que haya coherencia de los módulos entre el diseño realizado por el AASHTO 93 y la verificación por el método Racional.

A continuación, se presenta el ajuste de las variables detalladas anteriormente y la implementación de la determinación del módulo del material granular con insumo de RAP obtenido en el proceso.

⁴ El valor obtenido de Θ , fue determinado en el modelo estructural del pre diseño en el ajuste del diseño a una profundidad de 545 mm, donde la carpeta asfáltica se determinó a 22 cm, la base granular en 20 cm y la capa Granular con RAP a 25 cm.

Para tal efecto, se desarrollan tres (3) corridas a), b) y c) por el método Racional aplicándose conceptos del AASHTO 2008 y evaluándose por consumos del espectro de carga.

H	Metodo AASHTO/93					Verificación Método Racional					
	ai	Ei			Cd	Condiciones evaluadas					
		Kg/cm ²	PSI	Mpa		Kg/cm ²	PSI	Mpa	μ		
14 cm	0.35	27,532	391,602	2,700	1	1) Clima: TMAP: 18 a 24°C; Precipitación media anual: 1.000 -1.500 mm/año	20,000	284,467	1,961	0.35	1) Clima: Se insiste en la condición sumergida de la subrrasante.
20 cm	0.14	2,109	29,997	206.8	1	2) Periodo de Diseño: 10 años	1,800	25,602	176.5	0.4	2) Periodo de Diseño: 10 años
25 cm	0.12	1,054	14,991	103.4	1	3) Tránsito: N = 14'358.018 E8.2Ton, crecimiento 4.48%	1,800	25,602	176.5	0.4	3) Tránsito: Se mantiene el valor se evalua para Eje estandar 8.2 Ton. El espectro obtenido no refleja análisis.
35 cm	0.1	984	13,996	96.5	0.9	4) Confiabilidad 90%, Error estandar Zr=1.282; Error estandar So=0.49	1,800	25,602	176.5	0.4	5) Serviciabilidad: So = 4.2, Sf = 2.0 6) Resistencia subrrasante: Se postula la resistencia en condición sumergida. Resultado: Se determinan deformaciones pero no se evidencia calculo de consumos.
	CBR 4.5%	450	6,400	44.1		5) Serviciabilidad: So = 4.2, Sf = 2.0	450	6,400	44.1	0.5	
						6) Resistencia subrrasante: Se postula la resistencia en condición sumergida. Resultado: SN = 5.18 Requerida SN = 5.45 Ofrecido					

Grafica No 27. Variables de diseño proyectadas en los estudios del proyecto específico

Fuente: Elaboración propia. Anexo 2

Nota: Para los tres (3) análisis expuestos se evaluó el tránsito por espectros de carga y se encontró que $N_{8.2Ton}$. adoptado por el consultor es muy aproximado al análisis realizado obteniéndose: Diseñador (14'358.018) vs Obtenido de la revisión (14'157.937). Igualmente se procuró disponer para todos los casos los mismos espesores de las capas involucrados por que corresponde a los mínimos posibles y únicamente en la optimización se varió el espesor de la carpeta asfáltica.

a) Evaluación del diseño con las condiciones de módulos consignadas en el estudio del proyecto:

Como se puede denotar en el diseño hecho mediante el método AASHTO 93, el consultor aunque transcribe unos módulos, asume unos coeficientes estructurales “ai” que no son conformes con la correspondencia de módulos de la metodología; Ej: a_1 (CA) =0.35, el modulo seria según la metodología 1.969 Mpa. y se denota en el informe que es 2700 Mpa. Por lo tanto se procedió a realizar la modelación con los módulos según el método AASHTO/93 para que haya correspondencia en el análisis. Los parámetros de resistencia de la subrrasante se mantienen en condiciones de inmersión del CBR asignado.

Resultados: Por tal efecto el consumo en fatiga evaluado por el INA se obtiene un consumo elevado de 11.4%, aunque el ahuellamiento es bajo, por efecto del considerable espesor de las capas granulares con un consumo del 6%, a pesar de la deficiente proyección de resistencia de la subrrasante, determinándose que el modelo estructural se encuentra sub-diseñado.

b) Evaluación del diseño con las condiciones de módulos adoptados en la Metodología AASHTO 93:

Para esta evaluación, se adopta los módulos con el ajuste pertinente, los granulares con base al módulo de la subrrasante (en inmersión) y la Mezcla asfáltica con base en las condiciones del clima del proyecto (para ello se analizó las estaciones meteorológicas cercanas al proyecto para determinar la temperatura media mensual), determinándose un módulo de la carpeta asfáltica “ E_{ca} ” a una temperatura de 30.4°C y a 10 Hz., con base a una Temperatura media mensual de 22.5°C.

Resultados: Los módulos adoptados según los coeficientes asumidos por el consultor según el método AASHTO 93, los módulos determinan un consumo a la fatiga aún muy alto de 3.216% (INA) y 168.5% (SHELL), lo cual significa que la estructura está subdiseñada. Se observa que el consumo en ahuellamiento es mayor obteniéndose un valor de 19.4%. Tal aspecto del ahuellamiento se debe a la evaluación de las características de la subrrasante que debe ajustarse a los nuevos procesos de evaluación del Factor Clima; el cual, si se lo modifica en la presente evaluación del diseño cambiaría toda la condición de esfuerzos en la estructura.

Como conclusión, teniendo una deficiencia en la determinación de resistencia de la subrrasante en inmersión y disponiendo consumos muy elevados, fue factible optimizar el

diseño. Para este caso, para adoptar el módulo de la capa granular con RAP procedió a disponer el obtenido del coeficiente estructural adoptado por el consultor.

c) Optimización del diseño con las condiciones de módulos analizados en cada capa:

Para proceder al ajuste fue necesario aplicar la metodología del AASHTO 2008 para lo siguiente:

Factor clima⁵: $(Mr/Mropt^6) = 0.75$ Afectación de subrrasante (CBROpt. = 14.3% obtenido en ensayo de campo, donde no se observó afectación del clima en los granulares evaluándose sus propiedades).

Evaluación de consumos: Se aplicó la evaluación por fatiga de abajo hacia arriba con los métodos del INA y la Shell para MDC.

Resistencia de la capa granular de RAP: Para determinar el módulo de la capa granular con RAP se calcularon los esfuerzos principales en el pre diseño, observándose que el módulo alcanzado (1837 Kg/cm²) a partir del subproceso SP: MB-A2 era consistente con el adoptado, encontrándose que existe consistencia con los valores típicos para sub-base dejando como valor asignado en la optimización el adoptado de 1837 Kg/cm².

Resultados: Con los ajustes de módulos de las capas, sustentados con análisis más profundo se evidencia un contraste absoluto con lo proyectado en el diseño del proyecto; es así como la subrrasante paso de disponer apenas un Mr de 452 Kg/cm² a un Mr de 739 Kg/cm² y la carpeta asfáltica paso de $E_{ca} = 19.686$ Kg/cm² a 40.161 Kg/cm² y por efecto de la capacidad de soporte de la subrrasante los módulos resiliente de las capas granulares aunque variaron muy poco, se han dispuesto con valores acordes a las características

⁵ El módulo resiliente en un material no ligado varía inversamente a los cambios de humedad (Fredlund y Xing, 1994).

⁶ MRopt : Modulo resiliente en condiciones óptimas.

típicas de los mismos, incluyéndose en éstos la capa granular con RAP que paso de disponer de un Mr de 1207 Kg/cm² a 1837 Kg/cm².

De los cambios mencionados, se evidencia que el proyectista desconoció los propios resultados anexos al estudio, desestimándose principalmente las propiedades de una MDC con Asfalto Modificado con polímeros de Alto desempeño, el cual evidencia un desempeño muy diferente al de una MDC normal y que conforme a la proyección de su diseño de mezcla se adapta a las condiciones climáticas del proyecto.

En el análisis del espesor de la carpeta asfáltica que se incrementó de 14cm a 22cm, se refleja lo siguiente:

Con los módulos adoptados según los soportes del consultor son soportados mediante el análisis de la Curva Maestra para la MDC, el módulo de la subrasante fue afectado por el Factor Clima y el Módulo del material Granular con RAP, según el análisis determinado en la metodología. Observado el análisis con un espesor de C.A. de 22 cm se determinó un consumo a la fatiga 91.5% (INA) y 27.1% (SHELL), lo cual significa que la estructura estuvo sub-diseñada. Se observó que el consumo en ahuellamiento disminuyó obteniéndose un valor de 1.8% respecto al determinado anteriormente de 19.4%.

El análisis anterior se resume en la Gráfica No 28:

CAPA ESTRUCTURAL	a) Con módulos del proyecto						b) Con lo ajustado según soporte						c) Optimización del diseño					
	Espesor cm	Ei			Consumos %		Espesor cm	Ei			Consumos %		Espesor cm	Ei			Consumos %	
		Kg/cm ²	PSI	Mpa	Fatiga	Ahuell.		Kg/cm ²	PSI	Mpa	Fatiga	Ahuell.		Kg/cm ²	PSI	Mpa	Fatiga	Ahuell.
Carpeta Asfáltica - CA Mod. III - HP	14	19,686	280,001	1,930.5	11.438 %	6%	14	40,161	571,224	3,938.4	32.16 %	19.4%	22	40,161	571,224	3,938.4	91.5%	1.8%
Base Granular BG-40	20	2,109	30,000	206.8			20	3,059	43,511	300.0			20	3,000	42,670	294.2		
Sub base granular:SBG: RAP60%-SBG-50 40%	25	1,207	17,162	118.3			25	2,549	36,259	250.0			25	1,837	26,128	180.1		
Granular remanente: GR: (Clasificación SM)	35	984	14,000	96.5			35	1,295	18,420	127.0			35	1,200	17,068	117.7		
Subrasante	-	452	6,429	44.3	-	452	6,429	44.3	-	739	10,511	72.5						
OBSERVACION FINAL:	Deficiencia de módulos adoptados a pesar de ellos se evidencia sub-diseño						Deficiencia en la evaluación subrasante y se evidencia sub-diseño						Diseño consistente con la realidad del proyecto y conforme a la tecnología.					

Gráfica No 28. Resumen del proceso de optimización del diseño del proyecto específico.

Fuente: Elaboración propia. Anexo 2

Respecto a la evaluación de costos, en la Gráfica No 29 (a), se presenta inicialmente una valoración del costo de la implementación del RAP y su consecuente ahorro, que denota un valor de 53% respecto al precio de la sub-base granular disponible en la zona.

EVALUACION DE COSTOS REFERENTES AL USO DEL RAP Y LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO:

a) Costo de la actividad de disponer Sub-base Granular SBG50 al 100% versus Sub-base Granular RAP60% SBG50 40%:

ACTIVIDAD x m3	EQUIPO	MATERIALES	TRANSPORTE			M.O.	AUI	VR. TOTAL	%
			DISTANCIA	VR UNITARIO	VR PARCIAL				
Sub base granular:SBG-50	7,593	57,488	30	722	28,163	344	29,948	123,536	100
Sub base granular:SBG: RAP60%-SBG-50 40%	7,593	24,980	30	722	10,832	344	14,000	57,749	47
AHORRO por m3:								65,787	53

ACTIVIDAD x m3	EQUIPO	MATERIALES	TRANSPORTE			M.O.	AUI	VR. TOTAL	%
			DISTANCIA	VR UNITARIO	VR PARCIAL				
Fresado convencional	16,597	780	10	722	9,027	401	8,577	35,382	100
Fresado para reutilización del RAP	26,404	0	0	722	0	401	8,578	35,382	100
AHORRO por m3:								0	0

La diferencia del costo en el equipo radica en la mezcla del material en el sitio con la fresadora u otro equipo para esta actividad.

b) Comparación de costos de toda la obra entre: (1) Proyecto Inicial versus (2) Proyecto con reutilización de RAP y versus (3) Proyecto con ajuste del diseño

CONDICIONES ANALIZADAS POR KILOMETRO EN EL VALOR BASICO DE LA OBRA	Análisis de costos respecto al proyecto Inicial				Análisis de costos en la optimización		
	Valor	%(PI)	AHORRO respecto al proyecto inicial	>> meta física (%PI) (m.)	%(PR)	AHORRO respecto al proyecto sin ajuste	>> meta física (%PR) (m.)
Proyecto Inicial	2,087,080,826	100	0	0			-
Proyecto Inicial con reutilización de RAP	1,840,389,405	88.2	246,691,421	134	100	0	0
Proyecto con ajuste del diseño y R. RAP	2,266,147,197	109	-179,066,371	-79	123	-425,757,793	-188

c) Comparación de costos de la estructura del pavimento entre: (1) Proyecto Inicial versus (2) Proyecto con reutilización de RAP y versus (3) Proyecto con ajuste del diseño:

CONDICIONES ANALIZADAS POR KILOMETRO EN EL VALOR BASICO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	Análisis de costos respecto al proyecto Inicial				Análisis de costos en la optimización		
	Valor	%Reduc (PI)	AHORRO respecto al proyecto inicial	>> meta física (%PI) (m.)	%Reduc (PR)	AHORRO respecto al proyecto sin ajuste	>> meta física (%PR) (m.)
Proyecto Inicial	1,678,920,891	100	0	0			-
Proyecto Inicial con reutilización de RAP	1,432,229,470	85.3	246,691,421	172	100	0	0
Proyecto con ajuste del diseño y R. RAP	1,857,987,263	111	-179,066,371	-96	130	-425,757,793	-229

Gráfica No 29. Evaluación de costos referente al uso del RAP - Proyecto específico

Fuente: Elaboración propia. Anexo 2

Respecto a la implementación en el proyecto, en la Gráfica No 29 (b y c), se observa que al utilizar el RAP el proyecto se pudo ampliar su meta física en un 17.8% y respecto a la estructura del pavimento se alcanza 24.7% de incremento en la meta física.

Lastimosamente la deficiencia en la proyección de la estructura denota un decaimiento muy importante que eliminó y superó la ventaja que se había obtenido al utilizar el RAP.

8. RECOMENDACIONES DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para efecto de exponer las recomendaciones en la aplicación de la metodología, a continuación se listan aspectos a tener en cuenta en cada uno de los subprocesos identificados en el flujo de su desarrollo de la siguiente manera:

8.1 Sobre la evaluación de emplazamiento de la capa y del proceso industrial

Sin lugar a dudas, definir si el RAP se va a utilizar o no, es uno de las decisiones más importantes en un proyecto de rehabilitación y/o mejoramiento, no obstante debe tenerse en cuenta que existen dos (2) alternativas, reciclar o reutilizar; tratado el tema de cuáles son las ventajas o desventajas de cada una de ellas, seguramente, en cuestión de aporte estructural, la primera será una alternativa atractiva, pero debe evaluarse la capacidad del proyecto en asumir todas las condiciones que ello implica; y debe tenerse en cuenta también que en cuestión de impacto ambiental, ambas generan el mismo efecto, porque se disminuye notoriamente la necesidad de explotar, procesar y transportar la misma cantidad de material que se recicla o reutiliza que ya no tendría que traerse de la fuente de materiales.

Al evaluar la posibilidad de reutilizar se debe considerar que esta opción se puede llevar a cabo en cualquier condición del proyecto, toda vez que como se ha analizado, se puede desarrollar in-situ como también en un patio de procesos; al hacerse y determinarse una de estas opciones, se debe considerar que es fundamental el análisis del proyecto geométrico; entonces, prosigue el análisis de costos y la formulación del proceso administrativo para su implementación.

Es preferible pensar en reutilizar el material RAP como insumo de ambas capas granulares de base y sub-base; por que como se ha expuesto en este documento, las características y propiedades

del material se sustentan, incluso para formar parte de una capa asfáltica como es el caso del reciclado.

8.2 Sobre la piloto fresado y recomendación agregado adicional.

Conforme a cualquier proceso industrial, la prueba piloto de fresado es imprescindible, toda vez que de ésta parte el análisis técnico de la metodología, ésta debe realizarse preferiblemente en el sector de pruebas de campo, donde se haya determinado que es el sector característico de resistencia de la subrasante previsto en el diseño (para el caso de rehabilitación), para el caso de proyectos de mejoramiento, la ubicación de la prueba no tiene importancia.

Se debe procurar que la fresadora sea la misma tanto en las pruebas como en el proceso industrial y las picas se encuentre en buen estado, para prever que habrá coherencia entre lo proyectado como en lo ejecutado.

Sobre el material a adicionar, se debe identificar materiales competentes que cumplan independientemente los requisitos de calidad establecidos para la capa de granular prevista.

8.3 Sobre el diseño de mezcla y caracterización del material.

Normalmente se tiene tendencia a pensar que el RAP, es deficiente porque es un material recuperado y se menosprecia sus características sin haberlo evaluado; al respecto, nótese que, en el proyecto específico, la carpeta asfáltica estaba totalmente deteriorada, reparchada y con una deficiente regularidad, y a pesar de ello el material extraído en el fresado cumplió cabalmente los requisitos de la norma.

Por lo expuesto, al hacer el diseño de mezcla, se debe concentrar en analizar no únicamente el cumplimiento de la norma, sino también la proyección del material en reutilizar en todas las capas granulares de la estructura y evaluar la conveniencia de la gradación que se obtenga en las

condiciones climáticas de la zona; entonces es factible considerar mezclas densas en lugares secos y mezclas drenantes en lugares húmedos.

8.4 Sobre la verificación especial con ensayos de CBR y ensayos de módulo resiliente de las mezclas.

Es indispensable evaluar con ensayos de CBR en condiciones óptimas, las posibles mezclas que cumplan los requisitos de las normas de caracterización, porque de ello dependerá la evaluación técnica y económica; para ello, no es recomendable deducir que la mezcla con mayor resistencia es la más indicada; en cambio, se debe evaluar también la capacidad drenante, si esta es indispensable y destacar que entre más proporción de RAP se utilice, más económico resultará la construcción de la capa granular.

Respecto a los ensayos dinámicos, obsérvese en el Numeral 7 del Anexo 1 del presente documento, que su implementación de verificación, conlleva a una previsión frente a los protocolos del ensayo bastante exigentes que requieren un estricto control de calidad; tal aspecto, conlleva a determinar o no resultados fiables y coherentes con experiencias ya desarrolladas internacionalmente.

8.5 Sobre la determinación de Resistencia de las capas de apoyo.

Es muy importante desarrollar las pruebas de campo en el segmento de carretera más idóneo desde el punto de vista técnico, necesariamente en un sector de resistencia característica del tramo homogéneo evaluado; su implementación debe ser coordinadas con las pruebas de la capa a evaluar de Granular con RAP, dicho en otras palabras, se deben desarrollar en las mismas condiciones climáticas, preferiblemente en tiempo seco, donde las condiciones de resistencia se

encuentran casi en niveles óptimos, para con base en ello determinar posteriormente el factor climático directamente sobre los datos obtenidos.

Por otra parte, si se cuentan con apiques identificados previamente en los estudios previos, es preferible desarrollarse aproximadamente en los mismos sitios, siendo ello un elemento de verificación de la resistencia.

En el caso de pruebas con equipos de CBR y PDC (penetrómetro dinámico de cono), es necesario realizar la calibración del PDC para disponer de una correlación directa con los materiales estudiados, y preferiblemente ubicar las pruebas con referencias y datos de coordenadas precisas de los ensayos para posteriormente utilizar esta información en las pruebas de viga benkelman.

8.6 Sobre los ensayos de deflectometría de la capa granular con RAP.

Considerándose lo visto en el presente trabajo, es necesario que previamente a la evaluación, se establezca la carga a aplicar con la volqueta, obsérvese los efectos de la carga en la Grafica 24, donde es claro que dependiendo del espesor y condiciones del modelo estructural del ensayo de viga benkelman, se puede inferir a resultados que no sean necesarios evaluar.

De igual manera, se debe considerar que cada variación del espesor de los diferentes tramos homogéneos debe evaluarse independientemente, para disponer la suficiente información.

8.7 Sobre la recopilación de datos de resistencia y análisis de retrocálculo.

La interpretación de resultados y el análisis de los mismos es la clave de disponer el más adecuado resultado; al respecto, se recomienda tener en cuenta que los módulos de los materiales obtenidos con la deflectometría y retrocálculo son elevados, como se mencionó anteriormente, estos no son los resultados para adaptarse en el diseño y por ello debe tenerse en cuenta que las

condiciones de esfuerzo con la viga benkelman es diferente a la condición de esfuerzo de la capa granular en las condiciones de la estructura de pavimento desarrollada en el proyecto.

8.8 Sobre el análisis de resistencia característica adoptada para el diseño.

Una vez se aplique la metodología propuesta se determinará la resistencia de diseño; pero conforme a las nuevas metodologías de diseño de pavimentos, es factible que la resistencia obtenida sea afectada por el factor clima, lo cual debe analizarse independientemente.

8.9 Sobre el ajuste del diseño y comparación de costos.

Inicialmente, el propósito de realizar un ajuste en el diseño proviene de la necesidad de reemplazar la capa prevista de granular por otra que disponga como insumo el RAP; por otra parte, es factible que de acuerdo a lo expuesto en este documento generalmente se haya subestimado su resistencia; ahora bien, con la mejor intención en el debido proceso, se debe aprovechar al ajuste analizando toda la estructura, incluyendo la capa de rodadura y la subrasante, así mismo el proceso de determinación de la variable tránsito y el clima.

Respecto a la evaluación de los costos, se recomienda considerar su implementación ajustándose los análisis de precios unitarios, detallándose cada aspecto del proceso constructivo conforme a lo previsto en el contrato o proyecto específico.

CONCLUSIONES

Conforme a lo expuesto en el presente estudio, se evidencia que la práctica de reutilizar el RAP como un granular en procesos de rehabilitación o mejoramiento de carreteras, aunque se desarrolla en el país, su implementación se ha limitado al uso en capas de rellenos estructurales o de mejoramiento de la subrasante, siendo esto un notable desperdicio.

Se ha expuesto las experiencias y logros en otros países respecto a la reutilización del RAP en capas granulares de base o sub-base granular; de éstas, se destaca el avance que sobre ello ha logrado diferentes estamentos de los Estados Unidos donde han desarrollado esta práctica por más de 20 años y ahora disponen de normativas y estudios profundos sobre el tema, gestión que no se ha logrado en los países latinoamericanos.

La práctica de reutilizar el RAP (Recycled Asphalt Pavement) con adición de material de base o sub-base granular es recurrente, tanto como el reciclaje (ligado con asfalto u otros aditivos); es así como en Estados Unidos se ha promovido investigaciones para su caracterización, evaluación estructural, determinación de propiedades y demás aspectos, para su implementación dentro de la política de aprovechamiento; observándose que ambos procesos comparten la misma proporción en su uso, a pesar de que en dicho país, la maquinaria para reciclar y la tecnología para su realización es una de las más avanzadas del mundo.

Técnicamente, reciclar es la mejor opción, pero resulta una actividad que en muchas circunstancias es imposible de implementar como se observó en el literal b) del Capítulo 5 del presente documento; entonces, la siguiente opción es reutilizar, preferiblemente en las bases y sub-bases granulares del pavimento, de tal manera que el objeto de reciclar y reutilizar sea el mismo: “Aprovechar el material RAP totalmente y reducir en la misma cantidad que se reutiliza el RAP, el

material virgen a ser explotado en las fuentes de materiales; logrando así, la reducción del impacto ambiental deseado y la economía del proyecto, frente a la extracción, proceso y transporte de nuevos materiales, garantizando la sostenibilidad”.

Una característica que desestimula la reutilización del RAP, tanto para el reciclado como para la reutilización es la gradación, la cual repercute directamente sobre la respuesta de resistencia del material como se ha evidenciado en el presente estudio, pero es claro que al ajustar su gradación con la adición de un material complementario, permite el cumplimiento de las exigencias establecidas en las normas para carreteras en un proceso que no es difícil de realizar.

Con el presente trabajo se espera estimular la investigación en nuestro país, para efecto de disponer de una norma que establezca los procedimientos metodológicos para la implementación de la práctica de usar el RAP como un insumo de bases y sub-bases granulares, tanto para reducir el impacto ambiental como en la economía de los proyectos viales, siendo enfocado su desarrollo no únicamente en estructuras de pavimento asfáltico sino en todos los proyectos donde se pueda utilizar una capa granular de base y sub-base.

La metodología propuesta dispone de un protocolo simple para determinar la forma de reutilizar el RAP en capas de base y sub-base granular y determinar su aporte estructural, con el propósito que sea aplicada en los proyectos de rehabilitación o mejoramiento de carreteras, pero no se recomienda desarrollar esta práctica si no se aplica directamente con los materiales a reutilizar, toda vez que las características geométricas del proyecto vial, el equipo de fresado y las condiciones del pavimento pueden ser diferentes en cada caso.

La metodología propone la reutilización del RAP de dos (2) formas: a) En acopio, donde se puede preferiblemente implementar en capas de base granular y b) In-situ, previsto para una sub-base granular; para su selección en un proyecto vial, se determinó que dependería del

emplazamiento de la capa asfáltica a fresar, respecto a las capas de la nueva estructura, siendo éste un aspecto fundamental para la aplicabilidad en la implementación de la reutilización del RAP.

Como es de conocimiento general, el ensayo de viga Benkelman, visto por lo general en antiguos procedimientos de evaluación deflectométricas sobre capas de pavimento flexible, fue desplazado por ensayos de alto rendimiento como el deflectómetro de impacto entre otros, pero con el presente trabajo y la metodología obtenida, se rescata su uso para la aplicación de evaluación estructural de cualquier capa granular, obteniéndose una nueva forma de utilizar este dispositivo sencillo que funciona mediante el principio de la palanca.

BIBLIOGRAFÍA

- Angelone, S., Martínez, F., & Cauhape Casaux, M. (2000). *Caracterización Dinámica de Suelos Granulares*. Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario, Laboratorio Vial – Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (I.M.A.E.).
- Anochie-Boateng, J., Paige-Green, P., & Mgangira, M. (2009). *Evaluation of test methods for estimating resilient modulus of pavement geomaterials*. Pretoria, South Africa: Document Transformation Technologies cc.
- Bañon Blazquez, L., & Bevía García, J. F. (2000). *Manual de Carreteras 2 Construcción y Mantenimiento*. Madrid: Enrique Ortiz e Hijos Contratista de Obras.
- Benavides Bastidas, C. A. (2011). *Apuntes de clase: Módulo: Explanaciones y firmes*. La Paz, Bolivia.
- Benavides Bastidas, C. A. (2016). *Caracterización Dinámica de Materiales. Apuntes de clase: Diseño de Pavimentos Flexibles* (pág. 114). Popayán: Universidad del Cauca.
- Benavides, C. (2016). Conferencia de rehabilitación de pavimentos. *Rehabilitación de pavimentos asfálticos* (pág. 147). Popayán: Universidad del Cauca.
- Benavides, C. (2016). Conferencia de rehabilitación de pavimentos. *Rehabilitación de pavimentos asfálticos* (pág. 147). Popayán: Universidad del Cauca.
- Crespo del Rio, R. (1999). *La Ingeniería de firmes en el siglo XXI*.
- Federal Highway Administration (FHWA). (1997). *FHWA-RD-97-148 Assessing recycled/secondary materials as pavement bases*. FHWA.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2016). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction - Reclaimed Asphalt Pavement*. Washington, DC: Federal Highway Administration.

- Garnica Anguas, P., Péres García, N., & Gómez López, J. (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Sanfandila: Instituto Mexicano de Transporte.
- Higuera Sandoval, C. H. (2011). *NOCIONES SOBRE METODOS DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS – VOLUMEN I*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Hoppe, E. J., Lane, D. S., & Fitch, G. M. (2015). *Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use As Road Base and Subbase Material*. Charlottesville, Virginia: Virginia Department of Transportation.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Kentucky USA: Pearson Education, Inc.
- INVIAS - Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, I. (2013). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*. Bogotá: INVIAS.
- INVIAS - Guía Metodologica de Rehabilitación, I. N. (2008). *Guía Metodológica para el diseño de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. Bogotá: INVIAS.
- INVIAS, Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Bogotá: INVIAS.
- Kim, W., & Labuz, J. (2007). *Resilient Modulus and Strength of Base Course with Recycled Bituminous Material*. Minneapolis: Minnesota Department of Transportation.
- Leal Noriega, M. H. (2010). *Relación entre el módulo resiliente hallado por retrocalculo y el encontrado en ensayos de laboratorio*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Rebollo Mendez, A. A. (2015). *Evaluación Técnica y Económica del uso de Pavimento Asfáltico Reciclado (Rap) en Vías Colombianas*. Bucaramanga: Facultad de Ingeniería, Universidad Nueva Granada.

Saez, E. (2010). Rehabilitación de carreteras a menor costo. *Construcción Pan-Americana*, 1.

Obtenido de <http://www.construccion-pa.com/productos-y-tecnologia/rehabilitacion-de-carreteras-a-menor-costo/>

Schaertl, G. J., & Edil, T. B. (2009). *The Usage, Storage and Testing of Recycled Materials - Results of Survey*. Wisconsin: University of Wisconsin- Madison.

Vergara B., H. A. (2014). Diseño directo de pavimentos flexibles. *ECI*, 14.

WIRTGEN, Grup Company. (2016). El mundo de las fresadoras en frio de Wirtgen. *W_brochure_Cold-Milling-Machines_0316_ES*, 11,12 y 14.