

EVALUACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE MEZCLAS FRESADO Y BASE
GRANULAR PARA SU EMPLEO COMO AGREGADOS EN LA CONFORMACIÓN
DE BASES ESTABILIZADAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

DEISY MERCEDES SOLER VARGAS – CÓDIGO: 506186
JENNIFER DAYANN DUITAMA SÁNCHEZ – CÓDIGO: 506159

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2019

EVALUACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE MEZCLAS FRESADO Y BASE
GRANULAR PARA SU EMPLEO COMO AGREGADOS EN LA CONFORMACIÓN
DE BASES ESTABILIZADAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

DEISY MERCEDES SOLER VARGAS – CÓDIGO: 506186
JENNIFER DAYANN DUITAMA SÁNCHEZ – CÓDIGO: 506159

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería civil

Director de tesis
Ingeniero MARIO ALEXANDER CASTAÑEDA LÓPEZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2019



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá (noviembre, 2019)

Dedicamos el presente trabajo a los estudiantes y docentes de Ingeniería Civil de las diferentes universidades de Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primera instancia a Dios por darnos el privilegio de llegar tan lejos para lograr nuestros objetivos, por poner en nuestro camino personas que nos han apoyado en este proceso de estudio.

A nuestra familia por brindarnos sus consejos y ser nuestra motivación día a día, enseñándonos que trabajando fuerte se cumplen metas.

Al ingeniero Mario Castañeda, asesor de tesis, por colaborarnos en todo lo referente al desarrollo de la presente investigación, por los conocimientos compartidos, y por enseñarnos que todo esfuerzo tiene su recompensa.

A los laboratoristas por guiarnos en los ensayos de pavimentos y suelos requeridos.

A la Universidad Católica de Colombia, docentes, administrativos por acompañarnos, apoyarnos y orientarnos durante varios años en nuestro proceso de formación como ingenieras civiles.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES	19
1.1 TÍTULO	19
1.2 ALTERNATIVA	19
1.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	19
1.4 EJE TEMÁTICO.....	19
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	19
1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.7 OBJETIVOS.....	22
1.7.1 Objetivo general.....	22
1.7.2 Objetivos específicos	22
1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES	23
1.8.1 Alcances.	23
1.8.2 Limitaciones	23
1.9 ESTADO DEL ARTE.....	24
1.10 MARCO DE REFERENCIA.....	27
1.10.1 Marco teórico.	27
1.10.1.1 Conceptos previos	27
1.10.1.2 Niveles de tránsito.....	29
1.10.1.3 Ciclo de vida de un pavimento.	29
1.10.1.4 Mantenimiento y rehabilitación.....	30
1.10.1.5 Reciclado de pavimentos.	32
1.10.1.6 Evaluación del RAP.	35
1.10.1.7 Estabilización de un suelo.....	36
1.10.2 Marco legal.	37
1.11 ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACIÓN.....	38
2. METODOLOGÍA	39
2.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA	40
2.1.1 Granulometría (E-123)	41
2.1.2 Forma.....	42
2.1.2.1 Índices de alargamiento y aplanamiento de los agregados (E-230)	42

2.1.2.2 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (E-227).....	45
2.1.3 Desgaste.....	45
2.1.3.1 Desgaste en la Máquina de los Ángeles (E-218).....	46
2.1.3.2 Degradación en Micro Deval (E-238).....	47
2.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....	49
2.2.1 Resistencia	49
2.2.1.1 Proctor modificado (E142)	49
2.2.1.2 CBR (E-148)	50
2.3 EXTRACCIÓN DEL ASFALTO (E-732)	52
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
3.1 GRANULOMETRÍA.....	55
3.1.1 Evaluación de requisitos granulométricos.....	55
3.1.1.1 Base granular (fresado= 0 %)	55
3.1.1.2 Fresado (fresado= 100 %)	56
3.1.1.3 Mezcla (fresado= 50%)	57
3.1.1.4 Coeficiente de uniformidad	58
3.2 ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO.....	60
3.2.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos	62
3.3 CARAS FRACTURADAS.....	63
3.3.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos	63
3.4 DESGASTE EN MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.....	64
3.4.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos	65
3.5 DEGRADACIÓN EN MICRO DEVAL.....	66
3.5.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos	66
3.6 PROCTOR MODIFICADO	67
3.6.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos	68
3.7 CBR	69
3.8 EXTRACCIÓN DEL ASFALTO	73
4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	76
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de tránsito.....	29
Tabla 2. Métodos de mantenimiento y rehabilitación estructural de pavimentos ...	31
Tabla 3. Tipos de reciclaje de pavimentos asfálticos	34
Tabla 4. Marco normativo aplicado en la realización de ensayos	38
Tabla 5. Requisitos granulométricos del agregado para base tratada con cemento	41
Tabla 6. Requisitos de granulometrías admisibles para reciclaje de pavimento asfáltico.....	42
Tabla 7. Masa mínima de la muestra de ensayo después del rechazo de las partículas grandes y pequeñas	43
Tabla 8. Material preparado para ensayo de índices de alargamiento y aplanamiento	43
Tabla 9. Granulometrías de la muestra de agregado para ensayo de desgaste en Máquina de los Ángeles.....	46
Tabla 10. Especificaciones del espécimen de mezcla (fresado y base granular) para el ensayo de Desgaste en la Máquina de los Ángeles.....	47
Tabla 11. Especificaciones de la muestra para el ensayo de Micro-Deval (material comprendido entre 19 mm (3/4") y 9.5 mm (3/8")).	48
Tabla 12. Especificaciones del espécimen de mezcla (fresado y base granular) para el ensayo de Micro-Deval.....	48
Tabla 13. Cálculo de D10.....	59
Tabla 14. Cálculo de D60.....	59
Tabla 15. Tamaño máximo nominal según las granulometrías obtenidas	60
Tabla 16. Ecuaciones para cálculos de índices de aplanamiento y alargamiento .	61
Tabla 17. Verificación de parámetros INVIAS en los resultados de ensayos efectuados en la base granular	76
Tabla 18. Verificación de parámetros INVIAS en los resultados de ensayos efectuados en el fresado.....	76
Tabla 19. Verificación de parámetros INVIAS en los resultados de ensayos efectuados en la mezcla	76

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Verificación de requisitos granulométricos en la base granular, bajo parámetros de normatividad colombiana	56
Gráfica 2. Verificación de requisitos granulométricos en el fresado, bajo parámetros de normatividad colombiana	57
Gráfica 3. Verificación de requisitos granulométricos en la mezcla estimada con porcentaje de fresado del 50%, bajo parámetros de normatividad colombiana	58
Gráfica 4. Índices de aplanamiento comparados con límites máximos de norma ..	62
Gráfica 5. Índices de alargamiento comparados con límites máximos de norma ..	62
Gráfica 6. Porcentaje de partículas fracturadas con verificación de parámetros normativos	64
Gráfica 7. Pérdidas por desgaste en Máquina de los Ángeles comparadas con límites máximos de norma	65
Gráfica 8. Pérdidas por desgaste en Micro Deval comparadas con límites máximos de norma.....	66
Gráfica 9. Resultados del ensayo modificado de compactación	68
Gráfica 10. CBR vs. Energía de compactación.....	70
Gráfica 11. CBR vs grado de compactación en materiales ensayados	71
Gráfica 13. Verificación de parámetros normativos de grado de compactación vs. número de golpes en ensayo CBR	73
Gráfica 14. Granulometría del fresado post centrifugación en ensayo de extracción cuantitativa del asfalto	74
Gráfica 15. Comparación de granulometrías del fresado, antes y después de efectuar ensayo de extracción del asfalto	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de un pavimento flexible	27
Figura 2. Estructura de un pavimento semirrígido	28
Figura 3. Esquema del ciclo de vida de un pavimento asfáltico	30
Figura 4. Flujograma de la metodología de investigación	39
Figura 5. Calibrador de longitudes (para el índice de alargamiento)	44
Figura 6. Calibrador de espesores (para el índice de aplanamiento)	44
Figura 7. Base granular: (a) antes y (b) después de ensayar	45
Figura 8. Mezcla de RAP y agregado virgen sometida a abrasión en Máquina de los Ángeles: (a) antes y (b) después de ensayar	47
Figura 9. Muestra de RAP preparada para ensayo de Micro-Deval: (a) antes y (b) después de ensayar	49
Figura 10. Material compactado para ensayo Proctor modificado: (a) base granular y (b) fresado	50
Figura 11. Muestras de material sumergido para ensayo CBR	51
Figura 12. Muestras para verificación de humedad en ensayo CBR	51
Figura 13. Procedimiento de ejecución de ensayo Extracción del asfalto, parte 1: (a) asfalto en el platón de ensayo y (b) asfalto con papel filtro	52
Figura 14. Procedimiento de ejecución de ensayo de Extracción del asfalto parte 2: (a) adición de gasolina a la máquina de centrifugación y (b) líquido extraído	53
Figura 15. Muestra después de finalizar ensayo de Extracción del asfalto	53
Figura 16. Muestra seca después de ensayo de Extracción del asfalto: (a) muestra de fresado y (b) papel filtro	54

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Índices de aplanamiento por fracción y global de la base granular (0 % de fresado).....	81
Anexo B. Índices de aplanamiento por fracción y global del fresado (100 % de fresado).....	81
Anexo C. Índices de aplanamiento promedio por fracción y global de la mezcla (50 % de fresado).....	82
Anexo D. Índices de alargamiento por fracción y global de la base granular (0 % de fresado).....	82
Anexo E. Índices de alargamiento por fracción y global del fresado (100 % de fresado).....	83
Anexo F. Índices de alargamiento promedio por fracción y global de la mezcla	83
Anexo G. Esfuerzo vs penetración en ensayo CBR, 56 golpes (BG, mezcla y fresado).....	84
Anexo H. Esfuerzo vs penetración en ensayo CBR, 25 golpes (BG, mezcla y fresado).....	84
Anexo I. Esfuerzo vs penetración en ensayo CBR, 10 golpes (BG, mezcla y fresado)	85
Anexo J. Esfuerzo vs. penetración en ensayo de CBR para la base granular (56, 25, 10 golpes)	85
Anexo K. Esfuerzo vs. penetración en ensayo de CBR para la mezcla (56, 25, 10 golpes)	86
Anexo L. Esfuerzo vs. penetración en ensayo de CBR para el fresado (56, 25, 10 golpes)	86

ABREVIATURAS

BG: Base granular

BTC: Base tratada con cemento

CBR: California Bearing Ratio (Ensayo de Relación de Soporte de California)

CTB: Cement treated base (base tratada con cemento)

FDR: Full-Depth Reclamation (Regeneración de profundidad total)

IDU: Instituto de Desarrollo Urbano

INVIAS: Instituto Nacional de Vías

RAP: Reclaimed asphalt pavement (pavimento asfáltico recuperado, también llamado fresado)

SBG: Subbase granular

TMN: Tamaño máximo nominal de un suelo o agregado (por lo general, se toma el tamaño de tamiz cuyo porcentaje retenido acumulado esté entre el 5 % y 10%).

RESUMEN

La infraestructura vial, con el paso del tiempo tiende a deteriorarse por su mal uso, falta de mantenimiento adecuado y escaso seguimiento de los vehículos que transitan por las vías del país, otro factor relevante, es el clima, ya que a causa de este se pueden ver afectados los materiales que componen una vía, en un tiempo prolongado con un tránsito no adecuado genera que la vida útil del pavimento sea menor a la estimada.

Por lo anterior, es necesario la búsqueda e implementación de estrategias eficientes (ambiental y económicamente) de rehabilitación o mantenimiento, como el uso de materiales reciclados: la presente investigación analizó y evaluó el empleo de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en bases estabilizadas o tratadas con cemento (BTC) y en capas granulares sin ligante. La técnica estudiada, ofrece ventajas económicas y ambientales, pues los materiales extraídos no serán desechados y se requerirá una cantidad menor de agregado pétreo en las obras. El proceso de obtención del RAP, consiste en retirar la capa de rodadura, conformada por asfalto y agregados, de una vía existente.

Emplear material que no tiene las mismas propiedades físicas y mecánicas de un agregado virgen, pero que al mezclarse en cierto porcentaje genera un comportamiento similar al de una base granular, se convierte en una alternativa eficaz, que beneficiaría la malla vial nacional.

Se llevaron a cabo ensayos de caracterización física y mecánica de: el agregado virgen, el RAP y la mezcla propuesta (50 % - 50 %), para determinar si era apta para usarse como BTC. Durante los ensayos de granulometría, forma, desgaste y resistencia, se observó que las características físicas y mecánicas del material reciclado, son dependientes del contenido de humedad, el contenido de asfalto y el tipo de agregado, en el proceso se obtuvieron resultados que brindaron respuesta frente al comportamiento del material, con el propósito final de garantizar y promover el método de reciclaje en las vías que conforman el país.

Se concluyó que la sustitución de agregado virgen por RAP, mejora varias propiedades físicas como forma (solo parámetro de caras fracturadas), desgaste (Ángeles y Micro Deval), y afecta negativamente las propiedades mecánicas (CBR). El incremento de RAP, generó mayor porcentaje de caras fracturadas debido al proceso de trituración por el que pasa el pavimento, produjo menores pérdidas por desgaste ya que el asfalto se convierte en un ligante protector del agregado (fragmentos), sin embargo, dicho aumento, disminuyó significativamente la

resistencia (CBR), posiblemente, a causa de las características del residuo, puesto que este proviene de la capa superficial o asfáltica de una vía que ha sido sometida a cargas dinámicas constantes por un tiempo prolongado, lo cual ha desgastado la superficie y capas subyacentes (espesor de rodadura, base y subbase), además se debe considerar que el residuo, resulta ser un material dúctil (que presenta grandes deformaciones ante la aplicación de fuerzas) con pocos finos y alto grado de porosidad.

ABSTRACT

Over time, road infrastructure tends to deteriorate due to misuse, lack of adequate maintenance and poor monitoring of the vehicles that travel on the country's roads, another relevant factor is the climate, because it affects the materials that make up a road, in a prolonged time with inadequate traffic decreasing the useful life of the pavement.

For this reason, is necessary to search for and implement efficient strategies (environmentally and economically) for rehabilitation or maintenance, such as the use of recycled materials: the present research makes an analysis and evaluate the use of recycled asphalt pavement (RAP) in stabilized or cement-treated bases (CTB) and the granular layers without binder. The technique studied offers economic and environmental advantages, as the extracted materials will not be discarded and will be required a smaller amount of stone aggregate in the works. The process of obtaining the RAP consists of removing the wearing course, made up of asphalt and aggregates, from an existing road.

Using material that does not have the same physical and mechanical properties of a virgin aggregate, but when mixed in a certain percentage generates a behavior similar to that of a granular base, becomes an effective alternative, which would benefit the national road network.

Physical and mechanical characterization tests were carried out on: the virgin aggregate, the RAP and the proposed mixture (50 % - 50 %), to determine if it was suitable for use as CTB. During the tests of granulometry, shape, wear and resistance, it was observed that the physical and mechanical characteristics of the recycled material, are dependent on moisture content, asphalt content and type of aggregate, in the process were obtained results that provided a response to the behavior of the material, with the final purpose of ensuring and promoting the recycling method in the roads that make up the country.

It was concluded that the substitution of virgin aggregate by RAP improves several physical properties such as form (only parameter of fractured faces), wear (Angels and Micro Deval), and negatively affects the mechanical properties (CBR). The increase in RAP generated a higher percentage of fractured faces due to the crushing process through which the pavement passes, produced lower losses due to wear since the asphalt becomes a protective binder of the aggregate (fragments), however, this increase significantly decreased the resistance (CBR), possibly because of the characteristics of the residue, since it comes from the surface or asphalt layer of a road that has undergone to constant dynamic loads for a long time, which has worn the surface and underlying layers (rolling thickness, base and subbase), it must also be considered that the residue, turns out to be a ductile material (which presents great deformations before the application of forces) with few fines and a high degree of porosity.

INTRODUCCIÓN

El presente documento, es de gran importancia para ingenieros civiles en proceso de formación y profesionales especialistas en vías o áreas a fines, puesto que contiene información sobre una técnica actual de restauración o construcción de pavimentos, que contribuye a la conservación del medio ambiente. El estudio se desarrolla a través de una metodología concreta para evaluar la eficiencia del fresado aplicado en capas granulares, para ello, se realizan los ensayos de caracterización pertinentes, junto con los cálculos y análisis de resultados, los cuales incluyen verificación de parámetros normativos colombianos.

Hoy en día la conservación del ambiente es de gran importancia, ya que afecta a todos, en Colombia el reciclado de pavimento asfáltico es un método novedoso, y el cómo se lleva a cabo es inquietante para algunos, así que se realizó un estudio de las propiedades que tiene este material, llevando a cabo ensayos de laboratorio de dureza, resistencia, desgaste y geometría para determinar si el material del reciclado de pavimento asfáltico (RAP) mezclado con una base granular es apto para la utilización como agregado en la conformación de bases estabilizadas de pavimentos flexibles, tomando como guía los procedimientos descritos en la norma INVIAS.

En todo el planeta, anualmente se generan millones de toneladas de residuos producto de la demolición de pavimentos, comúnmente, estos se desechan (con frecuencia, haciendo vertimiento en lugares inadecuados), lo que produce alto grado de contaminación del medio ambiente, además del gran desperdicio que implica, ya que un alto porcentaje de estos materiales conserva sus cualidades, propiedades físicas y mecánicas, razón por la cual, la reutilización es una alternativa eficiente.

El RAP (pavimento asfáltico recuperado o reciclado, por sus siglas en inglés), se puede emplear para crear capas asfálticas nuevas de buena calidad, o para reemplazar una parte del material virgen en bases y subbases granulares estabilizadas o no, claro está que las mezclas resultantes requieren de tratamiento: adición de sustancias (estabilización) para mejorar sus propiedades, buen proceso de mezclado y ensayos para evaluar resistencia.

La pavimentación, ya sea construcción o rehabilitación de una carretera (empleando técnicas comunes), causa un impacto negativo considerable sobre el medio ambiente, donde tienen incidencia directa actividades como explotación de cantera, vertimiento de residuos, emisión de gases, etc., el reciclado de pavimentos disminuye dicho impacto, considerando que si todos o la gran mayoría de los residuos asfálticos, se reutilizaran, ya sea, directamente en obra (in situ), o acopiándolos para usarlos en presentes o futuras obras de pavimentación (aplicándoles el tratamiento adecuado según la condición actual del material y el uso que se le vaya a dar), se estaría beneficiando (a gran escala) al medio ambiente y generando un ahorro importante en términos de materiales, tiempo, transporte y costos.

Una de las características que tiene el reciclado del asfalto es que se ha integrado de una manera exitosa en las aplicaciones de las bases granulares ya que generan características de drenaje muy buenas, buena durabilidad y una capacidad de carga favorable para la vía. Así mismo, se puede generar un bajo rendimiento del pavimento asfáltico si no se mezcla o se procesa adecuadamente. El contenido del RAP es una de las incertidumbres que no han sido solucionadas, ya que en Colombia no hay mayor información sobre el tema, aun así, varios países, brindan información de acuerdo con el porcentaje de reciclado de asfalto específico que utilizan, de tal manera que si se aumenta la proporción de RAP puede generar una disminución en la capacidad de carga de la base granular.

1. GENERALIDADES

1.1 TÍTULO

Evaluación física y mecánica de mezclas fresado y base granular para su empleo como agregados para la conformación de bases estabilizadas para pavimentos flexibles

1.2 ALTERNATIVA

Trabajo de investigación

1.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Comportamiento de materiales granulares para pavimentos

1.4 EJE TEMÁTICO

Geotecnia y pavimentos

1.5 JUSTIFICACIÓN

“En América Latina la inversión en construcción que se genera en las vías para comodidad, seguridad y circulación óptima de los vehículos es alta, y el mantenimiento y recuperación de estas, genera elevados costos, por esta razón el uso de agregados reciclados (RAP), surge como una alternativa tecnológicamente viable y sostenible”¹, logrando la reducción de uso del material virgen. Hoy en día se cuenta con maquinaria que tritura el fresado a diferentes profundidades y con una gradación específica, el reciclado se realiza empleando variedad de técnicas ya sea en planta o en campo, aplicando ciertos procedimientos como estabilización y mezclado eficiente, para alcanzar el comportamiento y/o propiedades deseados.

La clave para manejar la problemática del estado de las vías, es el mantenimiento de estas ya que muchos de los materiales usados en la construcción de

¹ MARCELO DE JESUS, EXPERTS [en línea]. en: tecnologías para aplicación de asfalto fresado (RAP) [Consultado: 26/03/2019].

pavimentos pierden sus cualidades o características en poco tiempo haciendo que el mantenimiento sea más costoso y a veces no se cuenta con recursos necesarios para implementar los arreglos, a causa de esta problemática, se buscan métodos y formas que permitan la optimización de recursos con el uso de materiales reciclados, y así, disminuir costos y contribuir con el medio ambiente, evitando la explotación de cantera para la extracción de material virgen, reutilizando materiales como el RAP.

Si bien, en países de Europa, Asia y Norteamérica, y en unos pocos de Latinoamérica existen: gran variedad de trabajos investigativos sobre el uso de RAP, numerosos informes de su aplicación y desempeño en proyectos viales ya ejecutados, y algunas guías de procedimientos, en Colombia, se cuenta con normatividad muy superficial o escasa sobre las diferentes técnicas de reciclaje de pavimento asfáltico y respecto al uso de RAP en capas granulares, no hay una norma específica que lo regule. Esta falta de recursos técnicos, dificulta la evaluación y caracterización del residuo, pues queda a criterio de las instituciones y profesionales, escoger los ensayos y/o procedimientos que se realizarán para evaluar la condición del material y así, emplearlo cumpliendo parámetros técnicos.

La normatividad nacional disponible es: *especificaciones técnicas del IDU del año 2011*, secciones:

- 450 (Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica).
- 451 (Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con asfalto espumado).
- 454 (Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con cemento portland).

Y especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS año 2013, capítulo 4, artículos:

- 460 (Fresado de pavimento asfáltico).
- 461 (Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos).
- 462 (Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente)

En ninguna de las anteriores, se menciona el empleo de RAP en la conformación bases granulares, entonces para emplear esta técnica en proyectos nacionales, se deben hacer investigaciones exhaustivas sobre el tema, compilar normas internacionales y finalmente realizar todos los ensayos pertinentes.

1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una problemática evidente en Colombia y en otros países, es el mal estado de las vías (principalmente vías secundarias y terciarias), ya sea porque no están pavimentadas o porque el pavimento se encuentra en mal estado, debido a su uso constante, sobrecarga, efectos ambientales (clima, radiación solar, temperatura), contribuyendo también, los pavimentos de mala calidad, con materiales y/o procesos constructivos inadecuados, errores graves en el diseño o en los estudios iniciales, falta de vigilancia y control en la etapa de operación y deficiente mantenimiento.

Según informe del estado de la red vial nacional publicado por el INVIAS², en el año 2018, más de la mitad de las vías pavimentadas, se encuentran en regular-mal estado, y en el caso de la malla vial no pavimentada, casi el 90% presenta un regular-mal estado; situación que confirma la necesidad de mejorar o rehabilitar las vías, siendo una oportunidad para implementar nuevas y eficientes técnicas, tales como uso de pavimentos reciclados.

La construcción tradicional de pavimentos produce un impacto ambiental de gran magnitud: consumo de energía y agua, emisión de gases, polvo y material particulado, extracción de minerales, alteración de la geología de los suelos, mal manejo de residuos, etc. Una alternativa de mitigación (enfocada en los aspectos de extracción de minerales, alteración de suelos y manejo deficiente de residuos), es el uso de RAP como sustituto de un porcentaje de agregado virgen en bases y/o subbases granulares para pavimentos flexibles.

² INVIAS. Estado de la red vial criterio técnico segundo semestre 2018 [en línea]. Bogotá: Instituto Nacional de Vías [Citado 20 de marzo, 2019]. Disponible en internet: <URL:[https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-docu\(mentos/informacion-institucional/8397-estado-de-la-red-vial-criterio-tecnico-segundo-semester-2018.xlsx](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-docu(mentos/informacion-institucional/8397-estado-de-la-red-vial-criterio-tecnico-segundo-semester-2018.xlsx)>

La práctica de reciclaje objeto de estudio, conlleva un beneficio económico (debido al alto costo del agregado pétreo) además de optimizar tiempos y transporte de material, sin embargo, la poca o nula información disponible del pavimento que será triturado (antigüedad, rehabilitaciones que se le han realizado, especificaciones de diseño originales, material exterior introducido en el pavimento, etc.), y la escasa normatividad o parámetros de evaluación del residuo asfáltico final (para su uso como agregado en capas granulares), se convierten en la principal limitación, por ende, en varios países, debido a la falta de investigación y recursos técnicos, no se aplica el método mencionado.

Por lo anterior, se propone una metodología adecuada que permita la evaluación (eficiente y acertada) de mezclas de material granular virgen y fresado, con el fin de determinar las propiedades físicas y mecánicas que se ven afectadas al reemplazar agregado pétreo por RAP y así, responder la pregunta: *¿Qué efecto tiene sobre las propiedades físicas y mecánicas, la sustitución de base granular por RAP en una mezcla de agregados para la conformación de BTC?*

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo general. Evaluar la influencia de la presencia de RAP en las propiedades físicas y mecánicas convencionales de una base granular, para la conformación de capas de base estabilizada en una estructura de pavimento flexible.

1.7.2 Objetivos específicos

- Realizar caracterización física y mecánica del fresado y la base granular.
- Proponer una mezcla de fresado y base, que cumpla los requisitos granulométricos de norma.
- Plantear una metodología ordenada para caracterizar el material.
- Caracterizar física y mecánicamente la mezcla propuesta.
- Comparar los resultados de los ensayos de laboratorio con la información que brinda el marco normativo colombiano, para verificar el cumplimiento o no, para su empleo en reciclaje con cemento y asfalto.

- Comparar los resultados de los ensayos de laboratorio con la información que brinda el marco normativo colombiano, para verificar el cumplimiento o no, para su empleo en BG y SBG.
- Discutir sobre la idoneidad de los ensayos actualmente empleados en el país

1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.8.1 Alcances. La investigación va dirigida a estudiantes e ingenieros civiles con el fin de transmitir un mayor conocimiento, que permita tener en cuenta el uso de materiales reciclados que complementen los materiales vírgenes y las ventajas o desventajas que pueden ofrecer en el mejoramiento de la malla vial, por medio de ensayos de laboratorio como el CBR (Californian Bearing Ratio), proponiendo una mezcla para poder hacer uso de esta en campo, logrando la optimización de tiempo y costos .

Por otro lado, el presente trabajo pretende discutir sobre los requerimientos de las especificaciones INVIAS para los agregados pétreos que se emplean para BTC, con el objetivo de determinar las propiedades que se ven más afectadas por la presencia de RAP, a fin de tomar medidas que lleven a un mayor aprovechamiento del RAP en la incorporación de este tipo de mezclas; adicionalmente, se llevarán a cabo comparaciones con otros parámetros de norma (de base y subbase granulares), con el propósito de hacer una mejor evaluación de alternativas.

1.8.2 Limitaciones

- El ensayo de CBR, si bien es el que se utiliza para evaluar la resistencia de los suelos en Colombia, no simula el comportamiento real de un pavimento, pues los pavimentos están sometidos a cargas dinámicas (cíclicas) y es el módulo de resiliencia, el parámetro que describe con más exactitud dicho comportamiento.
- Heterogeneidad del RAP, dado que es un residuo, inicialmente su composición y comportamiento mecánico, son desconocidos.
- Desconocimiento del inventario de la malla vial: la falta de información de las vías existentes (estado actual de estas, especificaciones de diseño, registro de operaciones de rehabilitación etc), genera:
 - Escasas y/o deficientes obras de mantenimiento y rehabilitación donde son solicitadas.

-Procesos de recolección de información extensos y de mayor complejidad (gran cantidad de ensayos de campo y laboratorio, búsqueda y compilación de antecedentes a través de las fuentes disponibles).

-Al implementar el reciclado del residuo asfáltico (RAP), hay menor control y mayor incertidumbre sobre su calidad.

1.9 ESTADO DEL ARTE

Los pavimentos para carreteras y vías urbanas son estructuras, constituidas por un conjunto de capas compuestas por materiales seleccionados. Estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales (función estructural) y deben ofrecer comodidad, seguridad y confort para los conductores y pasajeros. Las cargas de los vehículos que transitan, producen deformaciones y agrietamientos en esta, lo cual hace que requiera mantenimiento y rehabilitación, razones por las que se implementa el reciclado del pavimento, ya que permite mejorar la superficie, conservar los recursos naturales y reducir los costos de construcción asociados con materiales.

Los primeros datos documentados sobre el uso de RAP para la construcción de las nuevas carreteras datan de 1915. Sin embargo, el desarrollo real y el aumento del uso de RAP ocurrió en la década de 1970 durante la crisis del petróleo, cuando el costo del aglutinante de asfalto (o asfalto), así como la escasez de agregados eran altos cerca de los sitios de construcción", por tales razones, se toma conciencia de preservar el medio ambiente y empiezan a surgir ideas de cómo lograr que ese fresado mezclado con otros aditivos, tenga la consistencia y resistencia que debe tener la estructura de un suelo para prolongar su vida útil³.

En el Sultanato de Omán (Asia), en la década de los 90, los profesores A.M.ASCE, Al-Harthy, Al-Shamsi, Al-Zubeidi⁴ hicieron estudios para evaluar el uso de cemento Portland tipo 1 en mezclas de fresado y base granular. Se llevó a cabo la caracterización física de los materiales (fresado y base), mediante ensayos de laboratorio (granulometría, límites, gravedad específica, ángeles, equivalente de

³ RESTREPO SIERRA Héctor Albeiro. STEPHENS ZAPATA, Steve Alexander. Estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío in situ de pavimentos asfálticos. Medellín. [en línea]. 2015. [consultado: 20/03/2019]. el título de especialista en vías y transporte. UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN.
⁴R. Taha, A. Al-Harthy, K. Al-Shamsi, and M. Al-Zubeidi, "Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases," J. Mater. Civ. Eng., vol. 14, no. 3, pp. 239–245, 2002.

arena) y con los resultados obtenidos, concluyeron que el fresado tiene propiedades físicas muy parecidas a las de un agregado virgen y en los parámetros de resistencia (compresión inconfiada), determinaron que a mayor porcentaje de cemento y agregado virgen, proporcionalmente aumenta la resistencia, y se requiere un espesor menor. Por el contrario, al incrementar la cantidad de RAP, disminuye la resistencia y se solicita un mayor espesor.

En China se implementó el (RAP) reciclado de pavimento asfáltico desde 1997 con la finalidad de preservar los recursos naturales, minimizando los costos y las rehabilitaciones, así que emplearon una nueva técnica llamada pavimento perpetuo. Se le denomina así porque tiene características estructurales que no permite el deterioro en un tiempo mayor a 50 años, de tal manera que no requiere mantenimiento ni en su capa de rodadura ni en las capas inferiores. Por esta razón el reciclado de pavimento sigue siendo una de las mayores soluciones para rehabilitar el pavimento.

Así mismo desarrollaron un programa informático de pavimentos llamado (SAMP5) creado por Hudson, McCullough, Nair y Chang, Lytton, como estrategia para planificar una pavimentación de óptima calidad. Este programa se encarga de realizar pruebas en materiales de pavimentos de asfalto reciclado con el fin de evaluar las características mecánicas y estructurales que se tendrán en cuenta a la hora de rehabilitar las carreteras.⁵

En China se efectuaron otros estudios, basados en ensayos de laboratorio con diferentes estabilizadores, adicionando cemento para la rehabilitación de calles y carreteras deterioradas, determinando que el asfalto reciclado aporta la suficiente resistencia para el transporte de cargas y así mismo darle un tiempo de vida útil prolongado a la estructura.⁶

⁵ Evaluating the performance of sustainable perpetual pavements using recycled asphalt pavement in china [en línea]. 9 de enero de 2017, [consultado: 24/08/2019].

⁶ YUE HUAN YANG, YING BIAO WU. advanced characterization of asphalt and concrete materials. [en línea]. mix design for full-depth reclaimed asphalt pavement with cement as stabilizer. 09/09/15. pagina 1. [consultado: 20/03/2019].

En algunos estudios realizados en Virginia (EUA), se demostró otra alternativa de uso para el pavimento de asfalto reciclado (RAP). Implementar su uso como base y subbase de carreteras. Este estudio determinó que se puede incluir el fresado como base y subbase granular, teniendo en cuenta el porcentaje permitido de reciclado de asfalto, el cual no puede pasar de 30 %. Al momento de usarlo se debe mezclar gradualmente para que el Departamento de Transporte de Virginia identifique los materiales y el proceso que involucra generar una base o sub base granular con el reciclado asfáltico.⁷

Según lo mencionado por los ingenieros especialistas en vías Abu El-Maaty, Elmohur⁸ de la Universidad Menoufia en Egipto, a partir de la aplicación del Protocolo de Kioto en 2005, el reciclaje trascendió y se convirtió en el foco de atención de muchas industrias, incluyendo la industria de la construcción de carreteras.

De acuerdo a investigaciones realizadas, en Argentina en los últimos años las vías han sido concesionadas y a causa de ello, notaron la importancia de alargar el ciclo de vida útil de los pavimentos. Por estas razones se realizaban rehabilitaciones y refuerzos, usando agregados y asfaltos nuevos, por lo cual, era necesario sobreexplotar las canteras existentes, generando un impacto ambiental negativo. De esta manera buscaron alternativas y soluciones con el fin de conservar el patrimonio vial, disminuyendo los gastos y aprovechando técnicas innovadoras como el reciclado de pavimento asfáltico.

En países europeos, se implementa el uso de fresado, aplicando diferentes proporciones que varían entre el 15 y el 50% de RAP, generando un gran avance en reparaciones viales, pero, aun así, se siguen realizando estudios, que indiquen como se puede emplear y aprovechar sus propiedades.

⁷ Edward J. Hoppe, et al, Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use As Road Base and Subbase Material. En: Report on State Project. **[en línea]**. Enero del 2015. **[consultado: 24/08/2019]**.

⁸ABU EL-MAATY, Ahmed Ebrahim. ELMOHR, Abdulla Ibrahim. Characterization of Recycled Asphalt Pavement (RAP) for Use in Flexible Pavement [Caracterización de Pavimentos de Asfalto Reciclado (RAP) para uso en Pavimentos Flexibles] . En: American Journal of Engineering and Applied Science [Revista Americana de Ingeniería y Ciencias Aplicadas]. Febrero - septiembre, 2015. p. 1-2

1.10 MARCO DE REFERENCIA

1.10.1 Marco teórico. Se abordan conceptos básicos del tema de estudio, así como información específica o teoría fundamental para el desarrollo, análisis y comprensión de la investigación.

1.10.1.1 Conceptos previos

➤ Pavimento flexible. Un pavimento flexible es aquel constituido por material asfáltico (bituminoso) y material granular; su estructura se presenta en la *Figura 1*.

Figura 1. Estructura de un pavimento flexible



Fuente. Los Autores.

Sánchez Sabogal⁹ explica las *funciones de las capas* de un pavimento flexible:

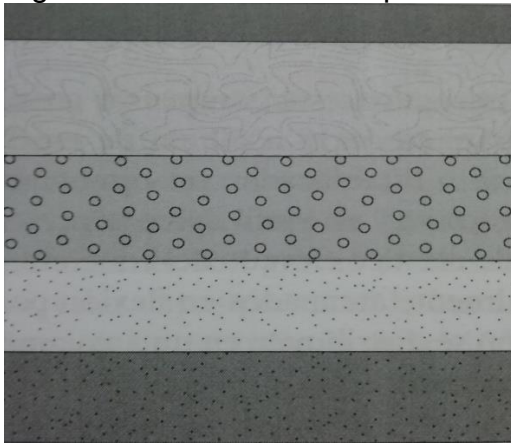
- CARPETA ASFÁLTICA O CAPA DE RODADURA (espesor de 5-10 cm): superficie uniforme y estable adecuada para el paso de vehículos.
- BASE (espesor de 10-30 cm): la composición de esta es materiales granulares no tratados colocados sobre la subbase y su función es recibir los esfuerzos de la capa de rodadura y transmitirlos a la subbase.
- SUBBASE (espesor de 10-30 cm): regula fenómenos de expansión, contribuye al drenaje y evita fenómenos de bombeo.

⁹ SÁNCHEZ SABOGAL, Fernando. Fundamentos teóricos guías para el diseño. Tomo1. 1ra ed. Bogotá, Colombia. 1984. p. 5 , p.7.

- SUBRASANTE (espesor de 20-50 cm): capa superior de las explanaciones, sobre la cual se construyen las capas ya mencionadas.

➤ Pavimento semirrígido. Es una estructura conformada por una capa asfáltica apoyada sobre una capa de materiales estabilizados con cementantes hidráulicos u otras sustancias, los cuales están soportados por capas granulares no tratadas de subbase y subrasante mejorada o natural (véase *Figura 2*).

Figura 2. Estructura de un pavimento semirrígido



Fuente. RONDÓN, Hugo Alexander. REYES, Fredy. Pavimentos: Materiales construcción y diseño. Primera edición. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2015. p.608.

Como se puede observar en la imagen anterior, las capas que componen un pavimento (en orden descendente), son:

- Capa de rodadura (3 cm -10 cm): su función es proteger la capa estabilizada del desgaste, proporcionando una capa de rodadura segura.
- Capas tratadas con ligantes hidráulicos (15cm - 25 cm): su función es impermeabilizar.
- Capa granular no trata de subbase (12 cm - 50cm)
- Subrasante mejorada (20 cm - 60 cm)
- Subrasante o terreno natural (espesor infinito): su función es servir de fundación del pavimento.

El pavimento semirrígido tiene la misma estructura de un pavimento flexible, con la diferencia que el primero está conformado por una o más capas rigidizadas artificialmente con ligantes hidráulicos, cal o cemento.

1.10.1.2 Niveles de tránsito. Cabe recordar los niveles de tránsito (véase *Tabla 1*) para diseño de vías en Colombia, pues estos hacen parte de las gráficas de resultados y sus respectivos análisis.

Tabla 1. Niveles de tránsito

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 KN	CLASE DE AGREGADO
NT1 (BAJO)	$N_{80KN} \leq 0,5$	C
NT2 (MEDIO)	$0,5 < N_{80KN} \leq 5,0$	B
NT3 (ALTO)	$N_{80KN} > 5,0$	A

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Aspectos generales. Capítulo 1. Bogotá: INVIAS, 2013. p.351-1.

Con base en la norma INVIAS actualizada, en el país, las capas granulares (SBG, BG, BTC), se diseñan para diferentes niveles de tránsito; los requisitos de calidad de estas capas, dependen del tránsito estimado de la vía.

1.10.1.3 Ciclo de vida de un pavimento. Los autores del Manual de Reciclado en frío Wirtgen¹⁰, explican los factores que causan el deterioro de un pavimento:

-Efectos medioambientales (clima, temperatura, humedad, rayos UV, hielo/deshielo, condiciones desérticas, expansión-retracción): Grietas superficiales, pérdida de elasticidad del pavimento y daño estructural (causado por la presencia de agua).

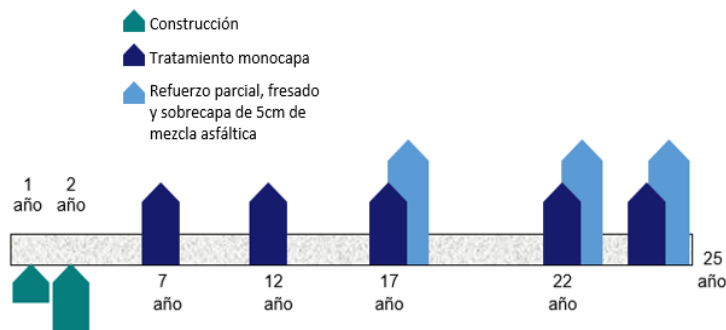
-Efectos del tráfico (flujo vehicular y camiones sobrecargados): Ahuellamiento, deformación permanente, agrietamiento por fatiga.

¹⁰ VARIOS AUTORES. Manual de reciclado en frío Wirtgen [en línea]. 2ed. Alemania: Copyright por Wirtgen GmbH. 2004. p.21-23. Disponible en internet: <https://docplayer.es/98239631-Wirtgen-manual-de-reciclado-en-frio.html>

-Ausencia de tráfico (Falta de amasado del pavimento): Oxidación y envejecimiento, causando grietas térmicas.

Evaluando los factores de deterioro y el tiempo, se define el tiempo de vida útil o ciclo de vida de un pavimento asfáltico (véase *Figura 3*), teniendo en cuenta la cantidad de rehabilitaciones o cualquier intervención que este requiera en determinado momento durante su etapa de operación.

Figura 3. Esquema del ciclo de vida de un pavimento asfáltico



Fuente. DURAVÍA. Esquema del ciclo de vida del pavimento de asfalto [en línea]. [Consultado: 27 de marzo de 2019].

Disponible en internet: <URL: <http://www.duravia.com.pe/ciclo-de-vida/> >

El esquema de la figura anterior, presenta el ciclo de vida para 25 años de un pavimento, como se puede observar, en los primeros años, no necesita ningún tipo de rehabilitación, después (aproximadamente a partir del año 7), va a requerir rehabilitación superficial (tratamiento monocapa o recapado) cada 5 años, y adicional, en el año 18 (tiempo considerable de uso), requerirá rehabilitación estructural parcial cada 3 o 5 años. Esto es una estimación, pues el ciclo de vida cada pavimento, dependerá de su diseño, tipo de materiales, condiciones climáticas del lugar, la calidad del mantenimiento (el cual, desde el inicio de la etapa de operación, debe ser rutinario), etc.

1.10.1.4 Mantenimiento y rehabilitación. Las acciones de mantenimiento y rehabilitación (véase *Tabla 2*), son de vital importancia porque permiten mantener el pavimento en buen estado, evitando su deterioro excesivo, y futuro daño superficial y/o estructural (ya sea parcialmente o en su totalidad).

Ya que el pavimento solicita constantemente rehabilitaciones, se debe estudiar a fondo el problema para establecer fallas graves en la estructura y en el caso de ser necesario, reconstruirlo totalmente, analizando los costos que generaría. Una herramienta que permite establecer la viabilidad económica de un proyecto, es el valor presente neto (VPN), este determina las ganancias o pérdidas que se generarían. En el caso de proyectos viales, permite analizar las diferentes opciones de rehabilitación o reconstrucción del pavimento y seleccionar la más adecuada, analizando la relación costo-beneficio, en muchos casos, resulta más económico reconstruir totalmente la vía, que

Algunos de los *métodos de rehabilitación y mantenimiento* que existen, son los mencionados por los autores del Manual de Reciclado en frío Wirtgen¹¹ y se resumen en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Métodos de mantenimiento y rehabilitación estructural de pavimentos

MANTENIMIENTO	REHABILITACIÓN SUPERFICIAL (5 cm a 10 cm de espesor)	REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL
Realizar drenaje adecuado, mantener obras de drenaje en buen estado; todo esto con el objetivo de alejar el agua del pavimento y así, evitar daños en él.	<p>Se aplica en asfaltos envejecidos o con grietas causadas por fuerzas térmicas.</p> <p>- Recapado asfáltico (4cm a 5cm): Verter capa asfáltica en caliente sobre la superficie existente (genera problemas de drenaje por el aumento de las cotas).</p> <p>- Fresar y reemplazar: Remover mediante el uso de una máquina fresadora la capa deteriorada, manteniendo las cotas.</p> <p>- Reciclar capa delgada: Reciclar la capa delgada de asfalto, para utilizarla después como mezcla caliente, pudiéndose usar otros aditivos.</p>	<p>Se hace cuando hay daño en la base, subbase y/o subrasante.</p> <p>- Reconstrucción total: Demoler totalmente el pavimento existente y construirlo de nuevo.</p> <p>- Capas adicionales: Construir capas tanto de material granular como asfáltico.</p> <p>- Reciclado profundo: Reciclar hasta donde esté el daño, con el propósito de recuperar la mayor cantidad de pavimento existente.</p> <p>- Combinación de reciclado in situ y en planta: Permite llegar a una mayor profundidad.</p>

Fuente. Los Autores

¹¹ VARIOS AUTORES. Manual de reciclado en frío Wirtgen [en línea]. 2ed. Alemania: Copyright por Wirtgen GmbH. 2004. p.24. Disponible en internet: <https://docplayer.es/98239631-Wirtgen-manual-de-reciclado-en-frio.html>

➤ Mantenimiento y rehabilitación en Colombia. El INVIAS diseñó una guía para la rehabilitación de pavimentos, en la cual se compilan los factores o aspectos más importantes a tener en cuenta en el proceso de mantenimiento o rehabilitación de la red vial: *recolección de información inicial* (ubicación geográfica de la carretera, tiempo de operación del pavimento, causas del deterioro, espesores y cantidades de obra) y *recolección de antecedentes* (condiciones del pavimento original: diseño geométrico, hidráulico, mantenimiento y rehabilitación posteriores, análisis de tránsito, informes de interventoría, etc).¹²

Los aspectos anteriores, son fundamentales para hacer un diagnóstico adecuado del estado del pavimento, y así, proponer diferentes alternativas (técnica, económica, social y ambientalmente idóneas), la información requerida se puede encontrar directamente en el INVIAS (si hay registro) y/o realizando los ensayos de laboratorio y de campo pertinentes según la alternativa a emplear.

Después de recolectar la información primaria o inicial, se debe obtener información específica o secundaria (por ejemplo: rugosidad, muestras de material, drenaje, gálipos, geometría, etc), la cual dependerá de la(s) técnica(s) de rehabilitación escogida(s) y el tamaño de proyecto. Con la información detallada, se plantean estrategias de rehabilitación (combinando alternativas o eligiendo una de ellas), continuando con el análisis de costos de las diferentes estrategias y finalmente, identificar la más viable.

1.10.1.5 Reciclado de pavimentos. Para rehabilitar una vía o carretera, en ciertos casos, es necesaria la remoción (trituration o fragmentación) del pavimento existente, ya sea solo su capa superficial (rodadura), rodadura y parte del estrato granular, o toda la estructura (reconstrucción total); el material resultante es considerado un subproducto y por lo general, se desecha. El reciclado, consiste en reutilizar este residuo, ya sea en una nueva capa asfáltica y/o, como refuerzo de las capas estructurales del mismo pavimento o de otros.

En los procesos de reciclaje eficientes, es indispensable definir el estado actual del pavimento, mediante ensayos (de resistencia o caracterización física), y búsqueda

¹² Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos [Consultado: 10 de julio de 2019]. p.290.

Disponible en internet: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>

de información y compilación de estudios anteriores (intervenciones de rehabilitación y/o mantenimiento, especificaciones de diseño, el tipo de tráfico que transcurre por esa vía, volúmenes de tránsito, etc).

Los métodos o técnicas de rehabilitación, están diseñados para prolongar la vida útil de una vía, pero, existen técnicas o procedimientos un poco deficientes, pues solo se centran en la superficie del pavimento, ignorando o afectando la estructura interna del mismo; por esta razón, se implementó una opción de reciclado mediante un proceso de “regeneración de profundidad total” (FDR). Este es un método de reciclaje en el que toda la estructura del pavimento asfáltico y base granular, se trata para producir una base estabilizada, es un proceso de reciclaje en frío, donde se agregan diferentes aditivos, como emulsión asfáltica, cemento portland , etc., para garantizar una base mejorada.¹³

Proporcionando beneficios a la construcción sin aumentar los costos ni afectar el medio ambiente. El proceso se basa en pulverizar el asfalto e implementarlo con materiales de base, sub base que al mezclarlo con cemento genera una nueva base estabilizada. Aplicando una superficie que genera una nueva estructura prolongando su vida útil.¹⁴

➤ Tipos de reciclaje

Existen diferentes formas o procedimientos para reciclar un pavimento: el reciclado se puede llevar a cabo con aplicación de calor o sin esta, respecto al lugar, se ejecuta directamente en el lugar de obra o en otros casos, se transporta el material resultante para acopiarlo. (véase *Tabla 3*).

¹³ “Federal Highway Administration Research and Technology Coordinating, Developing, and Delivering Highway Transportation Innovations,” Chapter 1. Introduction To Pavement Recycling, 2017. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/01.cfm>. [Accessed: 25-Oct-2019].

¹⁴ Luhr, David, et al Guía para la Recuperación de profundidad completa con cemento, EB234 Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2005, 14 páginas. , [consultado: 24/08/2019].

Tabla 3. Tipos de reciclaje de pavimentos asfálticos

TIPO/MÉTODO DE RECICLADO	DESCRIPCIÓN
<p style="text-align: center;">EN CAMPO (IN SITU)</p> <p><i>*En caliente:</i> Aplicación calor durante el procedimiento (con máquinas fresadoras que incluyen calentadores).</p> <p><i>*En frío:</i> Proceso de fresado sin aplicación de calor.</p>	<p>Se efectúa directamente en sitio, es decir, donde se encuentra el pavimento a intervenir, para ello, se utilizan máquinas fresadoras que trituran y a la vez, van colocando la nueva capa (mejorándola con aditivos o estabilizantes), este método genera ahorro de tiempo y transporte, sin embargo, una gran desventaja es el limitado control sobre los materiales de entrada.</p>
<p style="text-align: center;">EN PLANTA</p> <p><i>*En caliente:</i> Con el fresado en la planta, se tritura y clasifica por granulometría, se prepara la mezcla en caliente (adicionando agregado virgen, asfalto y agentes rejuvenecedores), y se lleva al lugar donde se aplicará.¹⁵</p> <p><i>*En frío:</i> Permite adición de agregados, control de mezclas y ensayo, todo sin adición de calor.</p>	<p>El fresado (pavimento triturado) se lleva a una planta, en la cual, pasa por un proceso de tratamiento, después es nuevamente transportado para su uso, o almacenado para un uso posterior. Este método garantiza mayor control sobre los materiales de entrada (fresado), optimizando procesos de mezcla y permitiendo también, realizar ensayos para evaluar el material.</p>

Fuente. Los Autores

➤ Reciclaje en frío. Cualquier técnica de reciclaje que, en su ejecución, no emplee calor (altas temperaturas).

¹⁵ Guía Metodológica para el Diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos [Consultado: 10 de julio de 2019]. p.290.

Disponible en internet: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>

➤ La técnica investigada (mezclas de fresado y agregado virgen empleadas como bases granulares), es un método de reciclaje en frío dado que, el pavimento triturado es incorporado en las capas granulares (cimentación del pavimento) y, en el proceso constructivo de estas, nunca se aplica calor. Los tipos de reciclaje en frío, se pueden observar en la figura:

1.10.1.6 Evaluación del RAP. La evaluación de un pavimento reciclado, es uno de los pasos más importantes ya que se tienen en cuenta toda la información inicial y secundaria obtenida, incluyendo resultados de los ensayos ejecutados y con esto, se recomienda clasificar el residuo según sus propiedades y determinar en qué procesos se puede aplicar. Una de las formas para determinar si un pavimento es apto para el reciclado, es identificar qué tipo de fallas tiene la estructura. Si se observa un pavimento con diferentes tipos de grietas y pérdida de agregados en la superficie, pero las capas de la estructura están en buen estado, el pavimento es apto para reciclar en frío.

Esta forma de reciclado hace que las grietas y fallas superficiales, generadas por los vehículos y/o condiciones ambientales, se eliminen completamente generando un pavimento nuevo, con mejores propiedades que logre soportar una capa de rodadura óptima para el tránsito que sea asignado.

Existen tipos de fallas que pueden necesitar un tratamiento especial (adición de cemento o aditivos), fallas por exceso de asfalto y deficiente proceso de mezclado, fallas por presencia de materiales orgánicos o fallas en pavimentos inestables por presencia de gran cantidad de agua en alguna capa, etc. Los pavimentos que tienen la subrasante, subbase y base completamente sana, son las mejores estructuras para realizar el reciclado en frío, aunque la mayoría de los pavimentos que tienen variedad de fallas, grietas y pérdidas de áridos pueden ser rehabilitados con reciclado ya proporciona una capa de rodadura libre de fallas.

En situaciones donde la base y subbase tienen propiedades pobres, se pueden ejecutar ensayos de reciclado en frío in situ usando cemento como aditivo estabilizador, pero se deben tener consideraciones específicas como: el porcentaje de espesor mínimo que debe tener la capa asfáltica al ser reciclado y el tiempo de curado a lugares del pavimento donde no alcanza la luz del sol.¹⁶

¹⁶ THENOUX, Guillermo. Study of techniques of cold recycling: second part (stages of a cold recycling Project UIT emulsion) volumen 1, (enero /2000) pag.17.

1.10.1.7 Estabilización de un suelo. Estabilizar un suelo o agregado, consiste en mejorar o modificar sus propiedades originales para obtener nuevas propiedades que satisfagan los requerimientos de diseño (resistencia y durabilidad) cumpliendo los parámetros de norma. En otras palabras, es adaptar el material original (la mezcla) al diseño requerido o deseado. La estabilización puede ser física, mecánica o química.

La estabilización de mezclas RAP y capas granulares (base y/o subbase) es fundamental, ya que las propiedades finales de la mezcla (sin estabilizar), no garantizan el cumplimiento de los requisitos técnicos, esto debido a las condiciones del residuo, el cual, a pesar de conservar algunas de sus características originales, presenta deterioro (grave, moderado, leve) causado por diferentes factores mencionados en capítulos anteriores. Una alternativa adecuada para estabilizar este tipo de mezclas, es el cemento, pues la adición de este, como lo especifican A.M.ASCE, Al-Harthy, Al-Shamsi, Al-Zubeidi¹⁷ en su artículo, aumenta la densidad seca máxima, por ende, la resistencia de la capa.

➤Tipos de estabilización:

-Estabilización física: Consiste en mezclar los materiales para homogenizar el agregado, no hay alteración química.

-Estabilización mecánica: Compactación del material.

-Estabilización química: Cambio químico (Adición de sustancias [cal, cemento, asfalto, cloruro de sodio, cloruro de calcio, escorias, polímeros, hule etc], que modifican las propiedades de un suelo o mezcla, mejorando su comportamiento).

➤*Beneficios de la estabilización:* Control de expansión, disminución de: compresibilidad, plasticidad, permeabilidad, erosionabilidad y aumento de resistencia.

¹⁷ A.M.ASCE, Ramzi Taha. AL-HARTHY, Ali. AL-SHAMSI, Khalid. AL-ZUBEIDI, Muamer. Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases [Estabilización con cemento del pavimento de asfalto recuperado Agregado para bases y subbases de carreteras]. En: Journal of materials in civil engineering [Revista de materiales de ingeniería civil]. Mayo - junio, 2002. p. 1

➤ Estabilización con cemento. “La base tratada con cemento (BTC) es una mezcla íntima de material agregado y/o suelos granulares combinados con cantidades medidas de cemento portland y agua que se endurece después de la compactación y el curado para formar un material de pavimentación duradero.”¹⁸ Al estabilizar con cemento, se aumenta la capacidad de carga del suelo, pero se debe tener cuidado en las proporciones agua/cemento de la mezcla ya que un exceso de cemento puede causar agrietamiento y poca cantidad de este, baja resistencia. Es recomendable usarlo en suelos gruesos, con poca materia orgánica

Para una base tratada con cemento la identificación y dosificación se determinan en peso o en volumen, de cemento, agua y de algunos aditivos. Estos materiales deben ser de la misma marca usada en la prueba que se le realice al material en laboratorio según la norma INV-808-07. Para controlar los procesos de conformación de BTC, se realizan controles de calidad. El interventor es quien ordena ensayos de control para el cemento, y verifica el contenido de sulfatos y el pH del agua. Así mismo se verifica el control de calidad de la mezcla, teniendo en cuenta, la homogeneidad, la humedad y la resistencia.¹⁹

1.10.2 Marco legal. Una normativa que rige los parámetros de calidad de las capas de cimentación y superficial de una vía, son las normas de ensayo y especificaciones que ofrece el INVIAS, estas no se pueden ignorar, puesto que todas las actividades, en especial la etapa de diseño, requieren justificación, comprobación y registro de cada uno de los procesos y/o materiales empleados para la ejecución de la obra, es importante que siempre se tengan claros los términos legales que se deben cumplir, ya sea para el diseño o el proceso constructivo, puesto que la omisión voluntaria o inconsciente de cualquiera de los requisitos, acarrea sanciones legales y/o económicas para los ingenieros a cargo.

En la Tabla 4, se puede apreciar el marco normativo que se tomó como referencia para la ejecución de todos los ensayos.

¹⁸ America's Cement Manufactures. Cement – Trated Base(CTB) [Base tratada con cemento (BTC)] [en línea]. [Consultado: 25 de marzo de 2019]. Disponible en internet: [https://www.cement.org/cement-concrete-applications/paving/cement-treated-base-\(ctb\)](https://www.cement.org/cement-concrete-applications/paving/cement-treated-base-(ctb))

¹⁹ I. D. URBANO, “Sección: 420-11 proceso especificación técnica: CAPAS DE MATERIAL GRANULAR ESTABILIZADO CON CEMENTO,” pp. 1–27. [consultado: 25/10/2019].

Tabla 4. Marco normativo aplicado en la realización de ensayos

TIPO DE ENSAYO	ENSAYO	NORMA
REQUISITOS GRANULOMÉTRICOS	GRANULOMETRÍA	INV - E- 123-13 INV CAP.3 - ART. 351-13
FORMA	ÍNDICES DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO	INV - E- 230-13
	PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS	INV - E- 227-13
DESGASTE/DUREZA	ÁNGELES	INV - E- 218-13 INV - E-218-07
	MICRO DEVAL	INV - E- 238-13
RESISTENCIA	PROCTOR MODIFICADO/ COMPACTACIÓN	INV - E- 142-13
	CBR	INV - E- 148-13
CONTENIDO DE ASFALTO	EXTRACCIÓN DEL ASFALTO	INV - E- 732-13

Fuente. Los Autores

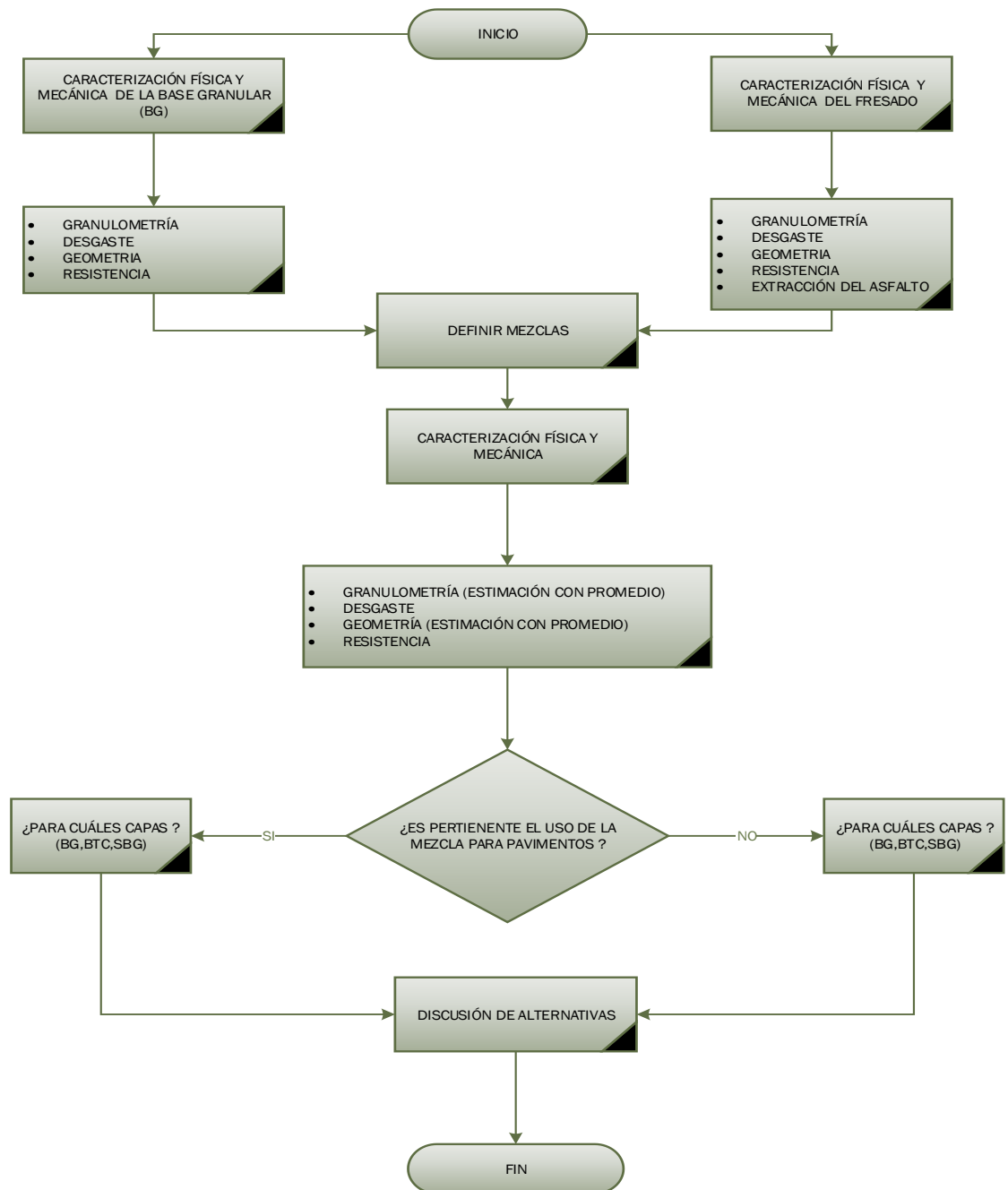
1.11 ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACIÓN

Repositorio de la Universidad Católica de Colombia, adicional se propone publicar el documento en páginas web académicas de temas de ingeniería y arquitectura, así como solicitar divulgación por parte de otras universidades que cuenten con el programa de ingeniería civil.

2. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta un resumen de la metodología en forma de flujograma.

Figura 4. Flujograma de la metodología de investigación



El programa experimental, se desarrolla en dos fases: caracterización física y caracterización mecánica, en cada una de las cuales se evalúa la influencia del RAP, en las propiedades de una BTC. Se llevaron a cabo los ensayos expuestos en el flujograma (véase *Figura 4*), donde se inició con la caracterización física de los materiales, continuando con la caracterización mecánica y por último, se efectuó el ensayo de extracción de asfalto para el fresado.

Se le realizó caracterización a:

- 1.Base granular (0 % de fresado)
- 2.Fresado (100 % de fresado)
- 3.Mezcla (50 % de fresado)

El fresado se adquirió en un centro de acopio ubicado en la localidad de Rafael Uribe Uribe, y la base granular proviene de la planta Concescol S.A Bogotá, Colombia. Todos los ensayos, se llevaron a cabo, solamente en un tipo de fresado y de base, se trabajó con el mismo material desde el inicio hasta la finalización del programa de ensayos.

2.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Inicialmente se realizaron las granulometrías de los dos materiales, en este caso la base granular y el fresado, seguido de esto, se llevaron a cabo los ensayos de forma (índices de alargamiento y aplanamiento, caras fracturadas) y finalmente, se realizaron los ensayos de dureza (Ángeles, Micro Deval, 10% de Finos).

➤Dureza

- Desgaste en la máquina de los Ángeles (E-218).
- Degradación por abrasión en el equipo Micro Deval (E-238)

➤Geometría de las partículas

- Índices de alargamiento y aplanamiento (E-230)
- Caras fracturadas (E-227)

➤Resistencia del material

- Proctor modificado(E-142)
- CBR (E-148)

2.1.1 Granulometría (E-123)

El objetivo de este ensayo, es determinar los diferentes tamaños y distribución de estos (cantidad de material por tamaño) de las partículas de un suelo o agregado u otro material. Se siguió el procedimiento especificado en la *norma INV- E- 123-13 (Determinación del tamaño de las partículas de los suelos)*.

Se tomaron dos muestras de fresado y dos de base granular, con el fin de promediar y obtener resultados más representativos. No se ejecutó el ensayo para la mezcla (fresado y base granular), dado que, con la gradación obtenida para cada material, es factible hacer un promedio ponderado para determinar la granulometría de dicha mezcla.

Las muestras de base granular se lavaron y secaron (en horno) antes de tamizar, en el caso del fresado, se omitió el secado en horno, ya que el material al someterse a temperaturas altas derrite la capa asfáltica que contiene este, haciendo que todo el material se pegue, formando una masa de material que no se puede manejar fácilmente al salir del horno.

El material se tamizó por las mallas respectivas (véase Tabla 5), incluyendo tamices adicionales (1/2", No. 8, No. 20, No. 100) para caracterizar mejor la curva.

Las franjas granulométricas obtenidas, se compararon con los requisitos de gradación para BTC (base tratada con cemento) presentados en el *Art. 351 de Especificaciones Generales INVIAS*, tabla 351-3 (véase Tabla 5).y con los parámetros expuestos en la norma 454-11 del IDU (Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con cemento Portland), tabla 454.1: Granulometrías admisibles para reciclaje de pavimento asfáltico (véase Tabla 6)

Tabla 5. Requisitos granulométricos del agregado para base tratada con cemento

TIPO DE GRADACION	TAMIZ (mm/U.S. Standard)							
	37,5	25	19	9,5	4,75	2	0,425	0,075
	1 ½"	1"	¾"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
	% PASA							
BTC-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	15-30	2-15
BTC-25	-	100	70-100	50-80	35-65	25-50	15-30	2-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0%	6%			3%			1,50%

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Base tratada con cemento. Capítulo 3, art.351. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 351-2.

Tabla 6. Requisitos de granulometrías admisibles para reciclaje de pavimento asfáltico

Tamiz		Porcentaje que pasa
mm	U.S. Standard	
37,5 mm	1 ½"	100
25,0 mm	1"	75-100
19,0 mm	¾"	65-100
9,5 mm	⅜"	45-75
4,75 mm	No. 4	30-60
2,00 mm	No. 10	20-45
425 µm	No. 40	10-30
75 µm	No. 200	5-20

Fuente. INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con cemento Pórtland. Sección 454-11. Bogotá: IDU, 2011. p.1

Con los resultados granulométricos, se propone la mezcla de 50% de fresado y 50% de base granular, con estos porcentajes se disponen todas las muestras de mezcla para los siguientes ensayos.

También se identifica el tamaño máximo nominal (TMN), ya que de este dependen las especificaciones para la preparación de muestras en los posteriores ensayos.

2.1.2 Forma

Se llevaron a cabo los ensayos de forma en:

- Base granular (0% de fresado)
- Fresado (100% de fresado)

Con estos resultados, se calcula un promedio ponderado para obtener los posibles resultados de la mezcla.

En los ensayos forma, la base granular se lavó y secó (en el horno) previamente, el fresado no.

2.1.2.1 Índices de alargamiento y aplanamiento de los agregados (E-230)

El objetivo de este ensayo es determinar los índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados (solo aplicable al agregado de tamaño superior a 1/4" e inferior a 2 1/2" para aplanamiento y 2" para alargamiento). Es importante definir este parámetro, dado que las partículas alargadas y/o aplanadas no son recomendables en el uso de capas granulares y mezclas asfálticas ya que en el proceso de

compactación tienden a fracturarse o desintegrarse modificando la granulometría y afectando el comportamiento y propiedades del material.

Se preparó la muestra según la norma *INV E- 230-13, tabla 230-1* (véase Tabla 7)

Tabla 7. Masa mínima de la muestra de ensayo después del rechazo de las partículas grandes y pequeñas

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO, mm (pg)	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO DEL ÍNDICE DE APLANAMIENTO, kg	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO DEL ÍNDICE DE ALARGAMIENTO, kg
50 mm (2")	35	-
37,5mm (1 ½")	15	15
25 mm (1")	5	5
19 mm (¾ ")	2	2
12,5 mm (½")	1	1
9,5 mm (¾ ")	0,5	0,5

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo. Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras. INV E-230-13. Bogotá: INVIAS, 2013. p. E 230-6.

Dado que el tamaño máximo nominal (TMN) del fresado es 3/4" y de la base granular es 1", según la tabla anterior, la masa mínima de cada uno es 2 kg y 5 kg respectivamente, sin embargo, se prepararon aproximadamente 5kg de cada material (véase Tabla 8).

Tabla 8. Material preparado para ensayo de índices de alargamiento y aplanamiento

TAMAÑO (")	MUESTRA (g)	
	BASE GRANULAR	FRESADO
1	1251	1337
3/4	1250	1330
1/2	1255	1255,2
3/8	1249	1296,8
TOTAL (g)	5005	5219

Fuente. Los Autores

-Para la prueba de índice de alargamiento, se pasó cada una de las partículas de cada fracción de muestra (por su lado más largo) entre el par de barras del calibrador de longitudes (véase Figura 5) por el espacio correspondiente según su tamaño, y al final se anotó el peso de las partículas pasantes y el de las no pasantes.

Figura 5. Calibrador de longitudes (para el índice de alargamiento)



Fuente. Los Autores.

-Para la prueba de índice de aplanamiento, se tomó toda la muestra ya ensayada (en alargamiento) separada en fracciones (como ya estaba), y se pasó cada partícula por el calibrador de espesores (véase Figura 6), en el agujero indicado según el tamaño. Se tomó el peso de las partículas pasantes y el de las no pasantes.

Figura 6. Calibrador de espesores (para el índice de aplanamiento)



Fuente. Los Autores

Figura 7. Base granular: (a) antes y (b) después de ensayar



Fuente. Los Autores

2.1.2.2 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (E-227)

El presente ensayo, tiene el propósito de determinar el porcentaje para este caso, en masa o por conteo, de partículas con determinado número de caras fracturadas (para este caso, una cara). Es fundamental medir este parámetro, ya que es un indicador de la fricción entre partículas, pues la fricción influye en la resistencia al corte: a mayor fricción, tiende a aumentar la resistencia.

La muestra se preparó según especificación de norma. Se tomó el material empleado en el ensayo anterior (*Índices de Alargamiento y Aplanamiento*) y se mezcló, tomando de este, el material requerido para caras fracturadas: 3000 g de base granular (TMN: 1") y aproximadamente 1604 g de fresado (TMN: 3/4")

2.1.3 Desgaste

El lavado y secado iniciales (al preparar las muestras), se omitieron para el fresado y para la mezcla, por otro lado, después de ensayar el material en las respectivas máquinas, este se tamizó, lavó, y secó (como lo exige la norma INV-13 correspondiente), pero solo las muestras de base virgen se secaron en horno (110°C hasta masa constante, aprox. 24horas), por lo tanto, los especímenes de RAP y mezcla, se secaron al aire libre (aprox. 2-3 días).

2.1.3.1 Desgaste en la Máquina de los Ángeles (E-218)

Este ensayo mide la resistencia a la degradación de los agregados gruesos (menores a 1 1/2").

Se empleó una muestra lavada y secada, preparada según las granulometrías presentadas en la tabla 2 de La Norma I.N.V.E – 218 (para este caso, año 2013, (véase Tabla 9) escogiendo la granulometría más parecida a la del material ensayado.

Tabla 9. Granulometrías de la muestra de agregado para ensayo de desgaste en Máquina de los Ángeles

Pasa Tamiz		Retenido en Tamiz		Masa de la muestra para ensayo (g) Granulometrías			
mm	(alt.)	mm	(alt.)	A	B	C	D
37,5	(1 1/2")	25	(1")	1250±25	...	...	...
25	(1")	19	(3/4")	1250±25	...	...	...
19	(3/4")	12,5	(1/2")	1250±10	2500±10	...	...
12,5	(1/2")	9,5	(3/8")	1250±10	2500±10	...	...
9,5	(3/8")	6,3	(1/4")	...	...	2500±10	...
6,3	(1/4")	4,75	(No.4)	...	...	2500±10	...
4,75	(No.4)	2,36	(No.8)	...	...	...	5000±10
TOTALES				5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5mm (1 1/2") por medio de la máquina de los Ángeles. INV E-218-13. Bogotá: INVIAS, 2013. p. E 218-5.

Para la base granular y para la mezcla, se aplicó la granulometría A. En el caso del fresado, se optó por la granulometría B.

Al iniciar el ensayo, se debe tener presente que las herramientas y equipos necesarios, estén en óptimas condiciones para su uso.

Se colocó el material y las esferas (12 para la granulometría A, 11 para la granulometría B) dentro del tambor de la máquina, esta se puso en marcha, girando entre (30 y 33 rpm), para este ensayo en particular, hasta completar 500 revoluciones. Finalizado el número de revoluciones (aprox. 20-30 minutos), se retiró la muestra y se tamizó sobre la malla No.10 (a falta del Tamiz No. 12), lo retenido se lavó, secó (en horno o al aire libre) y pesó, registrando dicho peso.

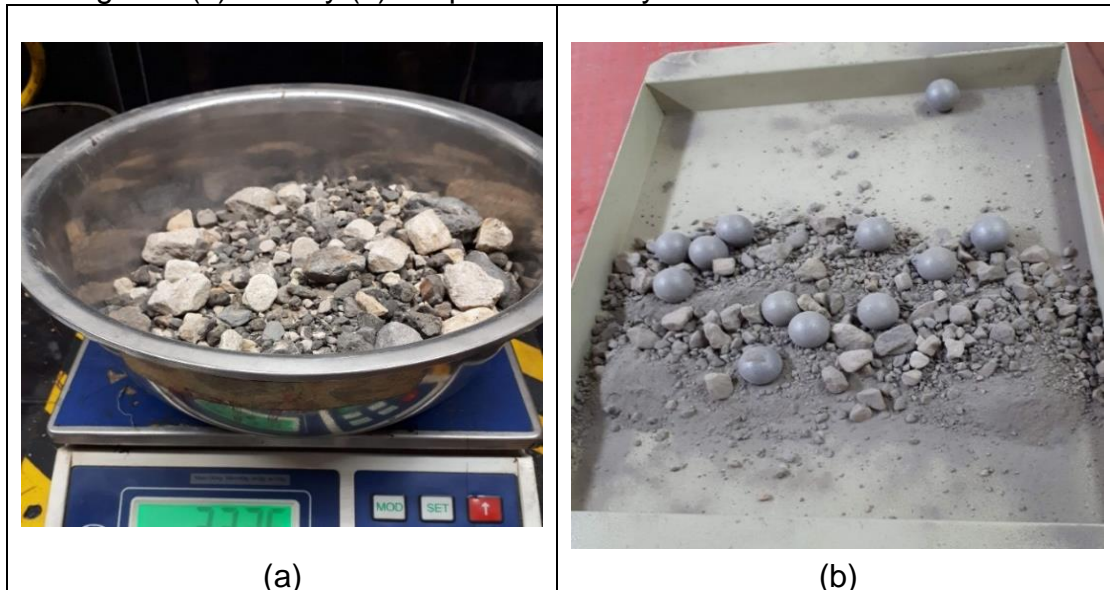
Debido a la gradación (escaso agregado de 1/2" Y 3/8") de la base granular disponible, la muestra de la mezcla, se preparó (adoptando Granulometría A) como lo especifica la siguiente tabla:

Tabla 10. Especificaciones del espécimen de mezcla (fresado y base granular) para el ensayo de Desgaste en la Máquina de los Ángeles..

TAMAÑO (")	PESO (g)	MATERIAL
1	1250	BASE G.
3/4	1250	BASE G.
1/2	1250	FRESADO
3/8	1250	FRESADO

Fuente. Los Autores

Figura 8. Mezcla de RAP y agregado virgen sometida a abrasión en Máquina de los Ángeles: (a) antes y (b) después de ensayar



Fuente. Los Autores.

2.1.3.2 Degradación en Micro Deval (E-238)

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia a la abrasión (impacto o choque) del agregado grueso, en condición crítica (saturado).

La norma *INV-E-238* especifica que primero se toma la muestra necesaria, se lava, se seca y tamiza por los tamices 3/4", 5/8", 1/2" y 3/8", hasta alcanzar las masas requeridas (véase Tabla 11), *sin embargo*, por practicidad, primero se tamizó hasta

obtener un poco más de lo requerido, se separó lo retenido en cada tamiz, se lavaron y secaron estas fracciones, y se preparó la muestra con la cantidad exacta.

Ya que no estaba disponible el tamiz de 16 mm (5/8”), este fue reemplazado por el siguiente, 19 mm (3/4”), empleando también el de 1”, para descartar el material de este tamaño.

Tabla 11. Especificaciones de la muestra para el ensayo de Micro-Deval (material comprendido entre 19 mm (3/4”) y 9.5 mm (3/8”).

PASA TAMIZ	RETENIDO EN EL TAMIZ	MASA (gr)
19,0 mm	16,0mm	375
16,0mm	12,5mm	375
12,5mm	9,5mm	750

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Normas de ensayo. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval. INV E-238-13. Bogotá: INVIAS, 2013. p. E 238-4.

Se seleccionó la tabla anterior, ya que el tamaño máximo nominal (TMN) del fresado es 3/4”, de la base 1”, y de la mezcla 1” (todos superiores a 12,5mm). La muestra preparada (tamizada y pesada), se depositó en el recipiente cilíndrico de abrasión Micro-Deval, agregándole 5 kg de esferas de acero (pequeñas) y 2 litros de agua, se tapó el recipiente y se dejó en reposo una hora aproximadamente, transcurrido este tiempo, el recipiente es sellado y puesto en la máquina por 2 horas, a una velocidad de 100 rpm.

Debido a la gradación (escaso agregado de 3/8”) de la base granular disponible, la muestra de la mezcla, se preparó así:

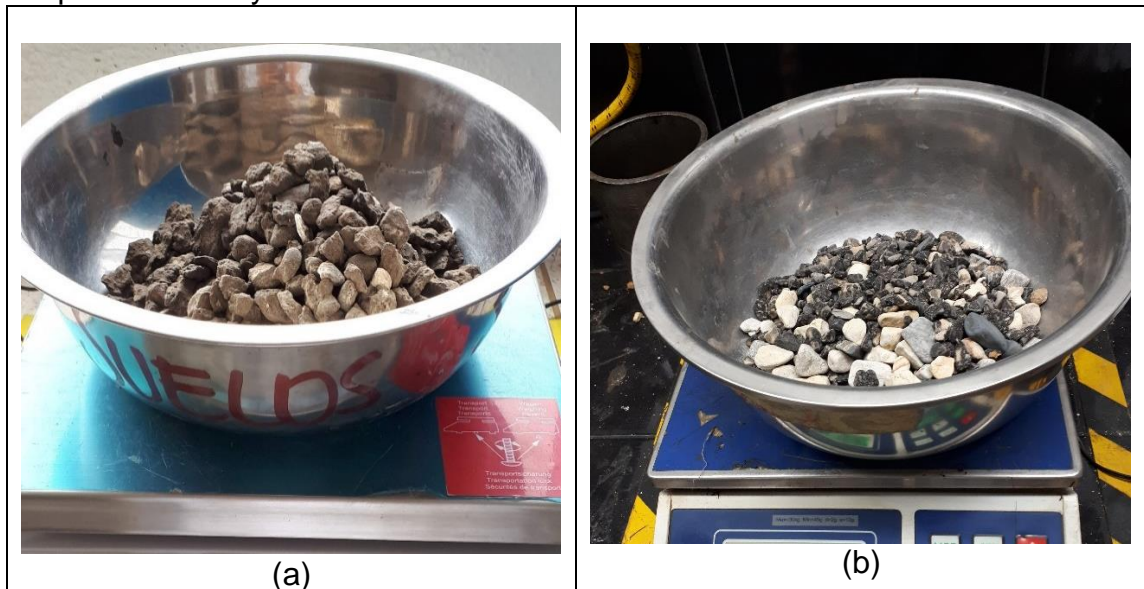
Tabla 12. Especificaciones del espécimen de mezcla (fresado y base granular) para el ensayo de Micro-Deval

TAMAÑO (")	PESO (g)	MATERIAL
3/4	375	BASE G.
1/2	375	BASE G.
3/8	750	FRESADO

Fuente. Los Autores

Se retiró el material junto con las esferas del recipiente cilíndrico, procediendo a lavarlos sobre el tamiz No. 16, a continuación, las esferas se removieron (con un imán especial), procurando evitar la pérdida de material. El material retenido se secó en horno y se anotó el peso seco para así calcular el porcentaje de pérdidas.

Figura 9. Muestra de RAP preparada para ensayo de Micro-Deval: (a) antes y (b) después de ensayar



Fuente. Los Autores

2.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

2.2.1 Resistencia

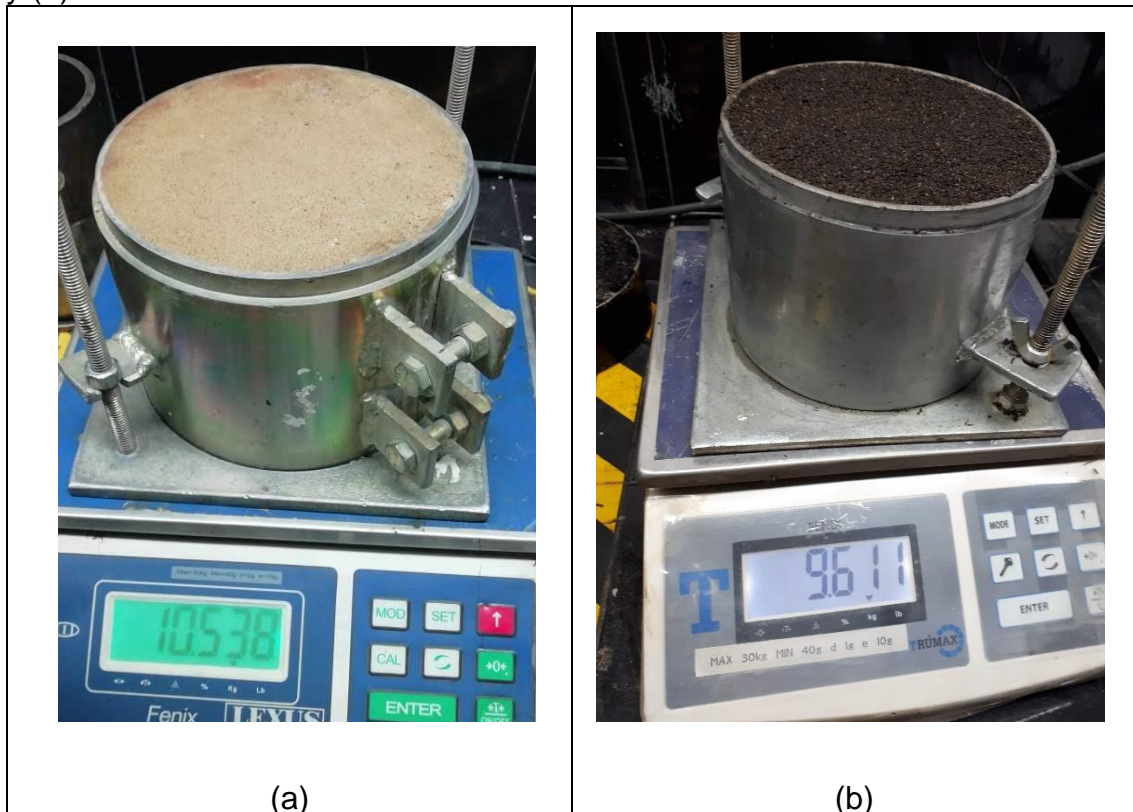
2.2.1.1 Proctor modificado (E142)

Este ensayo tiene como objetivo establecer la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos. La norma INV-E-238 especifica que para realizar este ensayo se debe implementar el uso de un molde de dimensiones específicas, 101.6 o 152.4mm de diámetro, con un martillo de un peso específico, de (10lbf), que debe producir una energía de compactación de $27000 \text{kn}\cdot\text{m}/\text{m}^3$.

Hay tres alternativas (A, B, C), de las cuales, se escogió una de acuerdo al tamaño máximo nominal (TMN) del material a ensayar, por tal motivo, el método a escoger fue el método C que cumple con los requisitos para ensayar el material, con un proceso de 5 capas cada una de 56 golpes. Se prepararon 4 muestras (puntos) con humedades, aplicando variación del 2 % (véase *Figura 10*). Así mismo se determinó

el peso unitario seco resultante de cada muestra. Finalmente, se estableció una curva de compactación que relaciona la densidad con los pesos unitarios secos y así, se halló punto máximo en el eje Y (densidad máxima) de la curva que determina la humedad óptima que debe tener el material.

Figura 10. Material compactado para ensayo Proctor modificado: (a) base granular y (b) fresado



Fuente. Los Autores

2.2.1.2 CBR (E-148)

El ensayo CBR, se hace con el fin de evaluar la resistencia de materiales con un TMN de (3/4). La norma determina la resistencia para suelos conforman la subbase, base y subrasante.

Se tiene en cuenta el mismo molde y martillo del Proctor modificado, adicionándole un disco espaciador en el interior como falso fondo. Se preparan tres muestras por cada material a ensayar, en este caso, base granular (BG), fresado y la mezcla, todas con la humedad óptima obtenida del ensayo de compactación, se tomó una

porción de las muestras preparadas, para verificar humedad y se compactaron cinco capas por cada número de golpes (56, 25, 10). Al terminar de compactar las nueve muestras, se colocaron en inmersión (véase *Figura 11*), para ello, se añadieron en la parte superior del molde dos pesas de igual magnitud y un vástago con un tornillo en la mitad, para regular la altura de la muestra, y se procedió a tomar la expansión diaria con un dial (deformimetro) armado en un trípode, durante 4 días que la muestra duró en inmersión total.

Al pasar el tiempo de inmersión, se retiraron las muestras del agua, y se fallaron, siguiendo los parámetros de La norma INV-E-148, se montó el dial medidor de manera que se pudiera medir la penetración cada (0.025" hasta llegar a 0.500"), anotando el valor correspondiente a la penetración. Para finalizar el ensayo se tomó una muestra de 100 gr del espécimen, en la zona donde se produjo la penetración para calcular la humedad del material (véase *Figura 12*)

Figura 11. Muestras de material sumergido para ensayo CBR



Fuente. Los Autores

Figura 12. Muestras para verificación de humedad en ensayo CBR



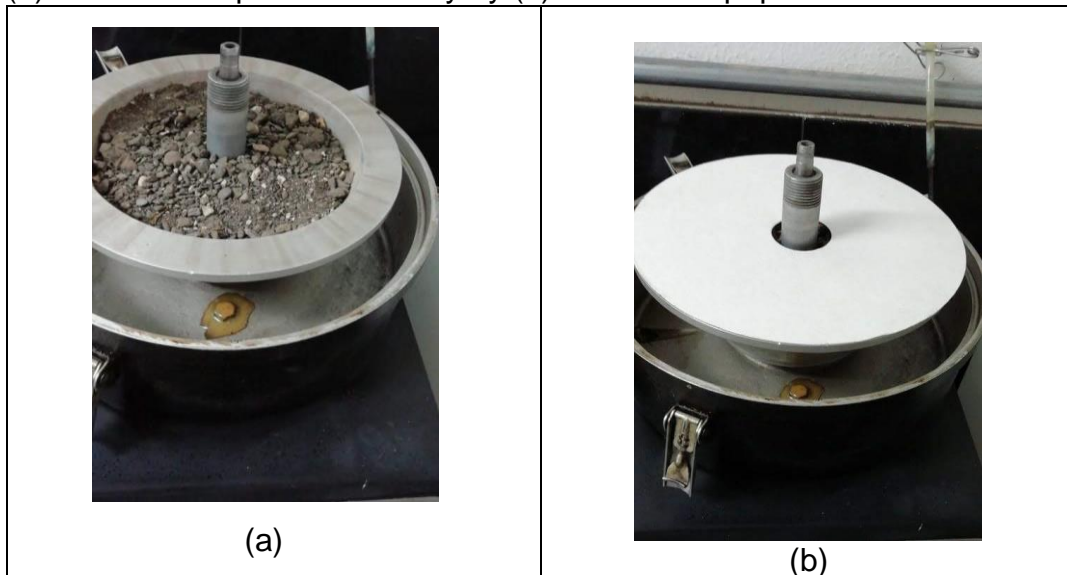
Fuente. Los Autores

2.3 EXTRACCIÓN DEL ASFALTO (E-732)

Se llevó a cabo el ensayo de extracción de asfalto con el fin de determinar la cantidad de asfalto que lleva el material de fresado a ensayar. La norma INV-E-732, indica que se debe usar un químico como el tricloroetileno, bromuro de n-propilo o cloruro de metileno, pero durante el ensayo, en el laboratorio no se encontraban esas sustancias químicas, por tal motivo, se empleó un derivado del petróleo, conformado por la mezcla de hidrocarburos (gasolina), como compuesto para la extracción del asfalto, se aplicó el Método A de la norma de referencia.

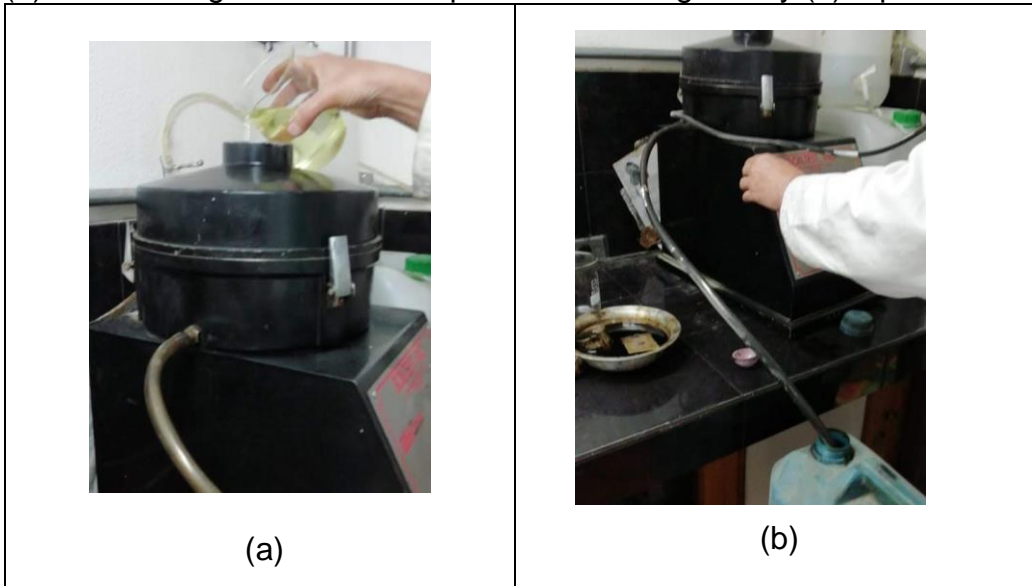
La muestra de pavimento con asfalto (fresado) se tomó de 1500 g, (aunque, de acuerdo al TMN que para el fresado es 3/4", la norma exige 2000 g), se colocó en una taza (con un papel filtro encima y adicionando el solvente, gasolina) en la máquina de extracción (véase *Figura 13*). Después de esto se encendió la máquina y esta empezó a centrifugar el material girando lentamente y aumentando la velocidad hasta un máximo de 3600 rpm, después del primer ciclo de centrifugado, se le agregó gasolina a la máquina (véase *Figura 14*) y se repitió el ciclo, esto se hizo varias veces, hasta observar que el líquido que extraía la máquina, saliera de color paja, se retiró el material de la máquina (véase , se secó, posteriormente, se registró su peso seco, se lavó y tamizó sobre el tamiz No 200, para realizar curva granulométrica del material.

Figura 13. Procedimiento de ejecución de ensayo Extracción del asfalto, parte 1: (a) asfalto en el platón de ensayo y (b) asfalto con papel filtro



Fuente. Los Autores

Figura 14. Procedimiento de ejecución de ensayo de Extracción del asfalto parte 2: (a) adición de gasolina a la máquina de centrifugación y (b) líquido extraído



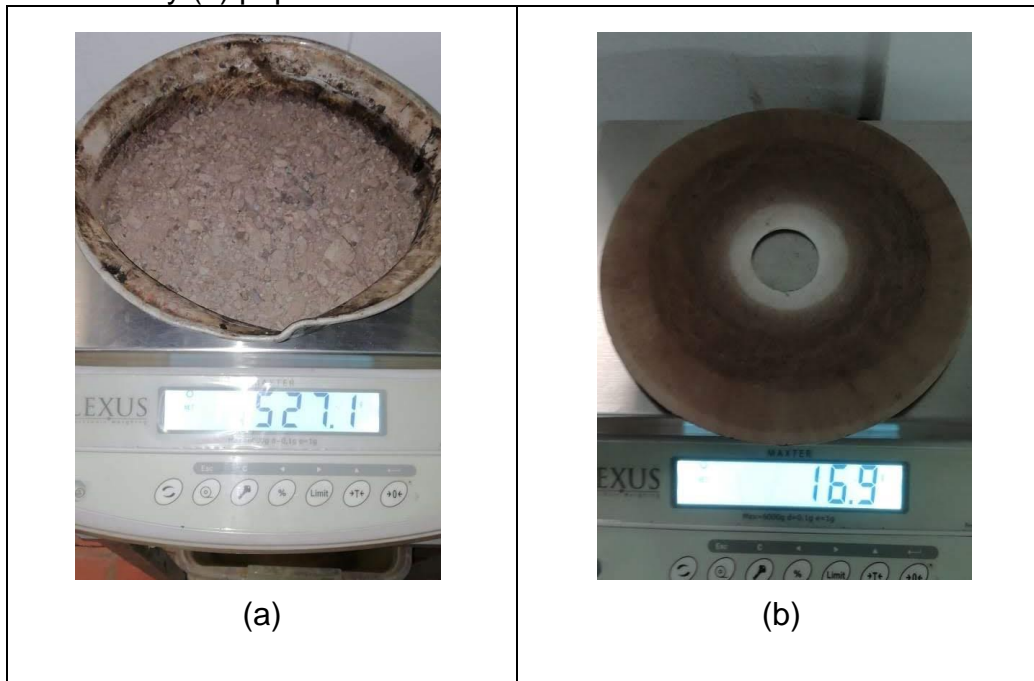
Fuente. Los Autores

Figura 15. Muestra después de finalizar ensayo de Extracción del asfalto



Fuente. Los Autores

Figura 16. Muestra seca después de ensayo de Extracción del asfalto: (a) muestra de fresado y (b) papel filtro



Fuente. Los Autores

El contenido de asfalto, se calculó con la diferencia entre la masa del agregado extraído y la masa inicial antes de la extracción, dando resultado al porcentaje de asfalto que contiene la muestra.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 GRANULOMETRÍA

En los ensayos de forma (índices de alargamiento-aplanamiento y caras fracturadas), desgaste (Ángeles, Micro- Deval), y resistencia (CBR), se hacen verificaciones técnicas tomando como referencia las tablas de requisitos del INVIAS²⁰, para BTC (objetivo del trabajo), y, debido a los estándares altos de este tipo de base, adicional se revisa también los requisitos para BG y SBG del INVIAS²¹, con la finalidad de generar más alternativas y plantear recomendaciones relevantes.

3.1.1 Evaluación de requisitos granulométricos

La gradación obtenida en cada caso, se compiló gráficamente en las franjas granulométricas respectivas, y estas, se evaluaron, contrastándolas con los límites normativos colombianos, con el fin de determinar si el material de estudio y la mezcla propuesta, cumple en términos de tamaño y distribución de partículas.

A continuación, se muestran los resultados (*véase Gráfica 1, Gráfica 2 y Gráfica 3*) de las granulometrías para los porcentajes de fresado 0 %, 100 % y el estimado (promedio) para la mezcla (50 % de fresado), se comparan con franjas granulométricas de normas nacionales.

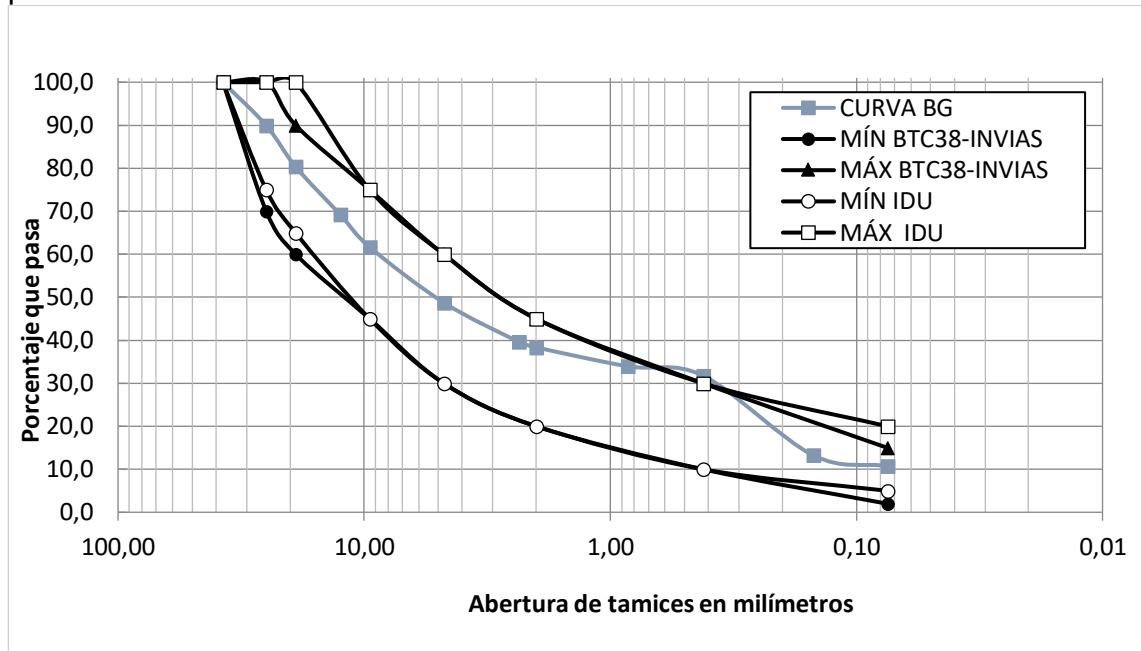
3.1.1.1 Base granular (fresado= 0 %)

Los resultados de tamizar las muestras (después de cuartear) de base granular, se aprecian en la siguiente gráfica

²⁰ Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Base tratada con cemento. Capítulo 3, art.351. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 351-2.

²¹ Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Subbase granular. Capítulo 3, art.320. Base granular. Capítulo 3, art,330. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 320-2, p. 330-2.

Gráfica 1. Verificación de requisitos granulométricos en la base granular, bajo parámetros de normatividad colombiana



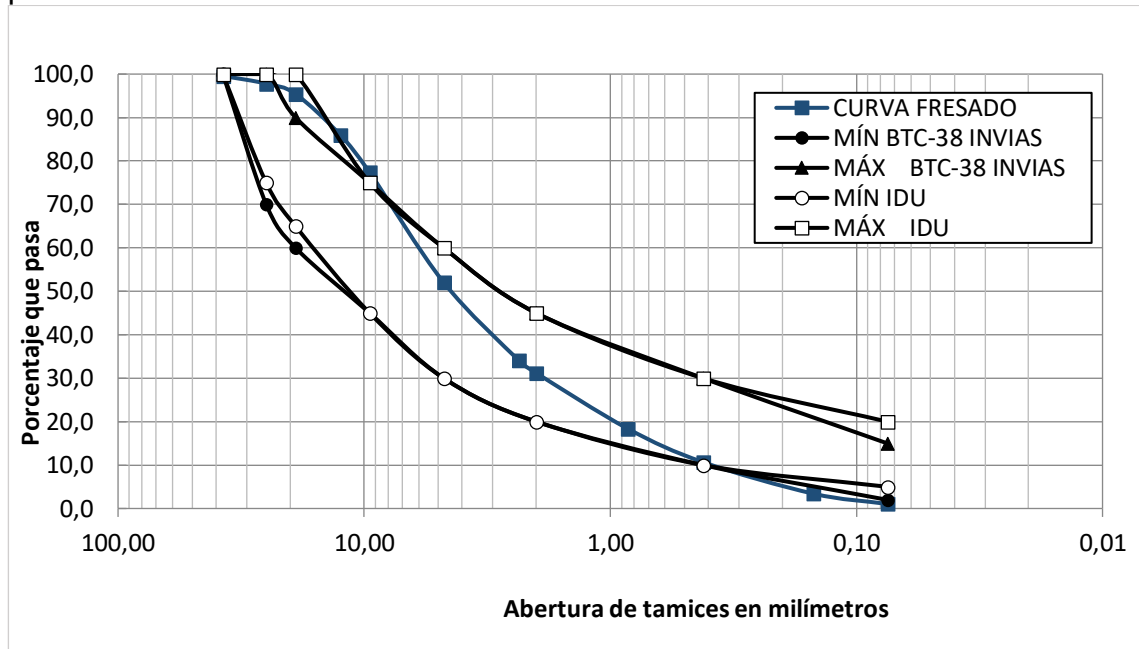
Fuente. Los Autores

La base estudiada, cumple con los parámetros de las normas de referencia (INVIAS-13 [Art.351] e IDU-11 [sección 454-11]), a excepción del punto que está por fuera de los límites (porcentaje que pasa tamiz No.40). Se selecciona la base tipo BTC-38 (INVIAS), pues es la que ofrece una curva granulométrica más parecida a la obtenida.

3.1.1.2 Fresado (fresado= 100 %)

Se tomaron las muestras de fresado, y, al igual que la base, se tamizaron (con promedio), tabularon y graficaron los resultados.

Gráfica 2. Verificación de requisitos granulométricos en el fresado, bajo parámetros de normatividad colombiana



Fuente. Los Autores

El fresado evaluado, cumple parcialmente los requisitos de las normas de referencia ya mencionadas, pues, como se observa en la gráfica, se presentan algunos puntos fuera de los límites.

3.1.1.3 Mezcla (fresado= 50%)

Para estimar la distribución granulométrica de la mezcla, se procede a realizar un promedio ponderado entre las granulometrías anteriores, así:

$$\% \text{ pasa} = \frac{(P_F * F) + (P_{BG} * BG)}{100}$$

Donde:

% pasa: porcentaje que pasa tamiz de referencia en la mezcla

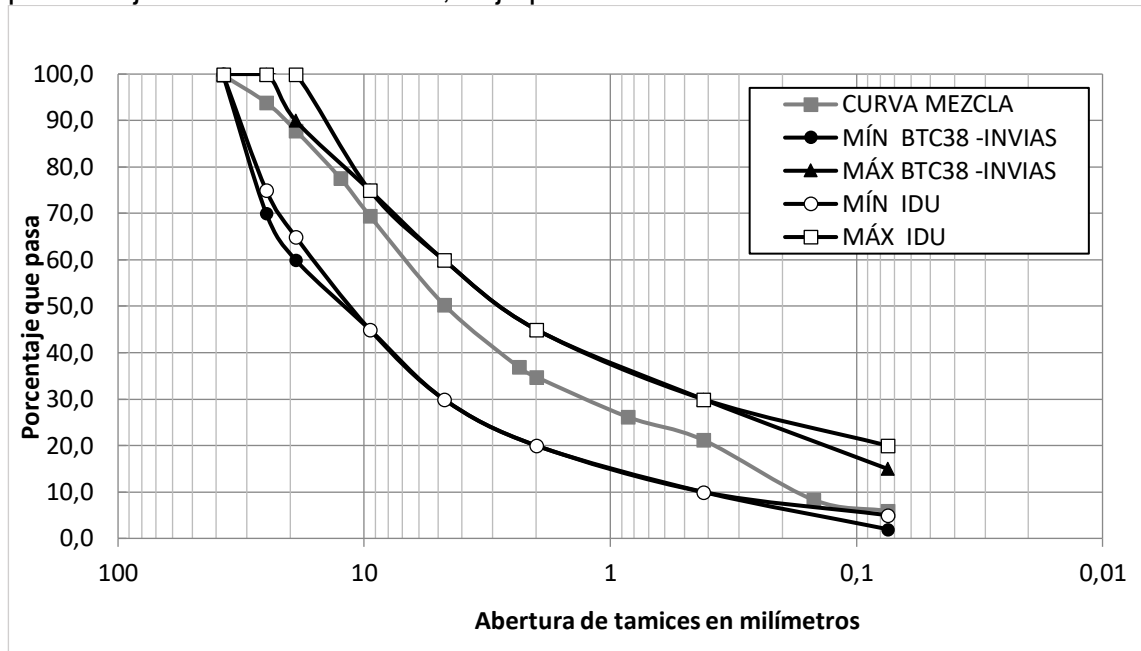
P_F : porcentaje que pasa tamiz de referencia en el fresado

P_{BG} : porcentaje que pasa tamiz de referencia en la base granular

F: porcentaje de fresado

BG: porcentaje de base granular

Gráfica 3. Verificación de requisitos granulométricos en la mezcla estimada con porcentaje de fresado del 50%, bajo parámetros de normatividad colombiana



Fuente. Los Autores

La mezcla con el 50 % de fresado y 50 % de agregado virgen, cumple los parámetros de norma, sin tener puntos que excedan los límites. Se puede afirmar que el fresado estudiado, presenta una gradación similar a la de una base granular, e implementándolo en una mezcla con agregado virgen, cumple los requisitos granulométricos para su empleo como base tratada con cemento.

3.1.1.4 Coeficiente de uniformidad

Se calcula también el coeficiente de uniformidad de los materiales, con la ecuación mostrada a continuación:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde:

Cu: coeficiente de uniformidad.

D60: tamaño donde pasa el 60 % de las partículas (mm).

D10: tamaño donde pasa el 10 % de las partículas.

Para hallar D60 y D10, se aplica la siguiente fórmula de interpolación lineal semi logarítmica, o en algunos casos (se requiere aplicar interpolación solo lineal, es decir sin logaritmos en la ecuación):

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log x_2 - \log x_1} * (\log x - \log x_1) \right] + D_1$$

Donde:

Dx: diámetro que se desea hallar (D60 o D10).

x: porcentaje de partículas que pasan por el Dx (10 % o 60 %).

Las demás variables, se mencionan en la *Tabla 13* y *Tabla 14*.

Tabla 13. Cálculo de D10

MATERIAL	TAMIZ			PASA TAMIZ DE REFERENCIA		D10
		mm	VARIABLE	%	VARIABLE	
BG	No. 200	0,075	D2	10,76	X2	0,070
	-----	0	D1	0,00	X1	
MEZCLA	No. 40	0,42	D2	21,21	X2	0,202
	No.100	0,15	D1	8,35	X1	
FRESADO	No. 40	0,42	D2	10,67	X2	0,405
	No.100	0,15	D1	3,42	X1	

Fuente. Los Autores

Tabla 14. Cálculo de D60

MATERIAL	TAMIZ			PASA TAMIZ DE REFERENCIA		D60
		mm	VARIABLE	%	VARIABLE	
BG	3/8"	9,5	D2	61,66	X2	8,948
	No. 4	4,75	D1	48,75	X1	
MEZCLA	3/8"	9,5	D2	69,51	X2	7,329
	No. 4	4,75	D1	50,38	X1	
FRESADO	3/8"	9,5	D2	77,36	X2	6,458
	No. 4	4,75	D1	52,02	X1	

Fuente. Los Autores

Con los datos de D10 y D60 obtenidos, se procede a calcular los coeficientes respectivos:

➤ $Cu_{BG} = 128,38$

➤ $Cu_{mezcla} = 36,24$

➤ $Cu_{fresado} = 15,96$

Dado que, el coeficiente de uniformidad representa la extensión de la curva granulométrica, a mayor extensión, se tendrá una mayor variedad de tamaños, entonces entre mayor sea dicho coeficiente, el suelo presentará una mejor gradación, por lo cual, el material mejor gradado de los ensayados es la base granular, sin embargo el fresado, tiene una distribución de tamaños aceptable.

Para finalizar los análisis granulométricos, en la *Tabla 15*, se identifica el tamaño máximo nominal de los suelos:

Tabla 15. Tamaño máximo nominal según las granulometrías obtenidas

MATERIAL	% RETENIDO ACUMULADO	TAMIZ TMN(")
BG	10,07	1
FRESADO	4,58	3/4
MEZCLA	6,13	1

Fuente. Los Autores

3.2 ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO. Para los cálculos del presente ensayo, se aplican las ecuaciones presentadas en la *Tabla 16*, para hallar los respectivos índices de aplanamiento y alargamiento, globales (totalidad o promedio), y en cada fracción (muestras por tamices), igualmente, se calcula el índice correspondiente a dicha fracción.

Tabla 16. Ecuaciones para cálculos de índices de aplanamiento y alargamiento

ÍNDICES DE APLANAMIENTO	
Por cada fracción	Global o total
$IAi = \frac{mi}{Ri} * 100$ <p>Donde: <i>Ri</i>: masa de la fracción d/D (g); <i>mi</i>: masa de las partículas planas de la fracción d/D (g).</p>	$IA = \frac{M3}{M1 \text{ o } M2} * 100$ <p>Donde: <i>M1 o M2</i>: masa total de la muestra (g); <i>M3</i>: masa de todas las partículas que pasaron el calibrador de aplanamiento (g).</p>
ÍNDICES DE ALARGAMIENTO	
Por cada fracción	Global o total
$ILi = \frac{ni}{Ri} * 100$ <p>Donde: <i>Ri</i>: masa de la fracción d/D (g); <i>ni</i>: masa de las partículas alargadas de la fracción d/D (g).</p>	$IL = \frac{M13}{M11 \text{ o } M12} * 100$ <p>Donde: <i>M1 o M2</i> : masa total de la muestra (g); <i>M13</i>: masa de todas las partículas retenidas en el calibrador de alargamiento (g).</p>

Fuente. Los Autores

Los índices de aplanamiento y alargamiento por fracción, se encuentran en los anexos (véase Anexo A, Anexo B, Anexo C, Anexo D, Anexo E, Anexo F).

Se calcularon los índices globales de la mezcla mediante un promedio ponderado, el cual varía con el porcentaje de fresado:

$$I = \frac{(I_F * F) + (I_{BG} * BG)}{100}$$

Donde:

I: índice global de aplanamiento o alargamiento de la mezcla

I_F: índice de aplanamiento o alargamiento del fresado

I_{BG}: índice de aplanamiento o alargamiento de la base granular

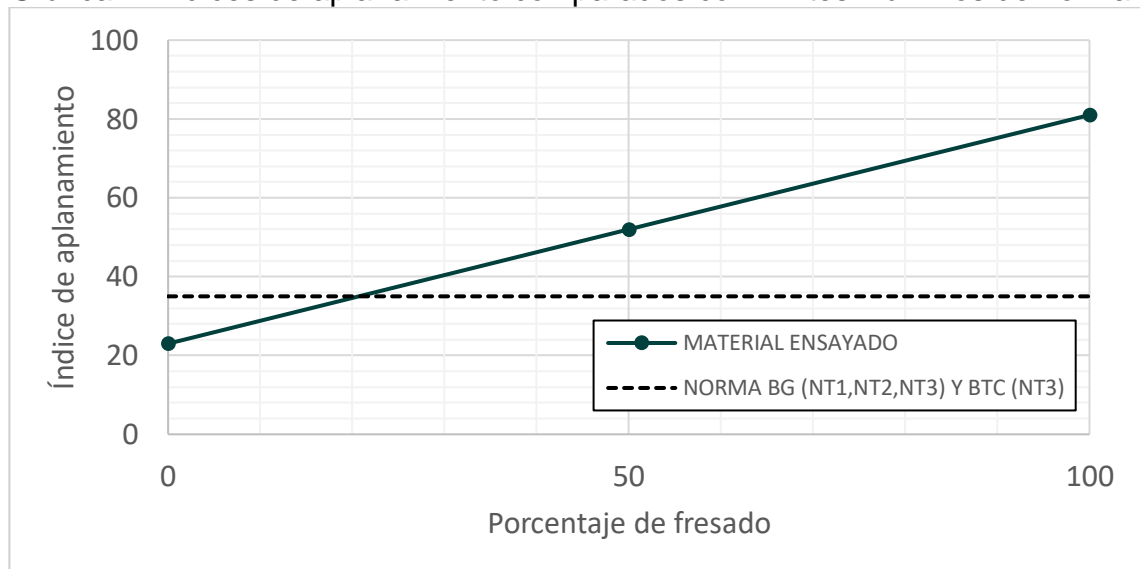
F: porcentaje de fresado

BG: porcentaje de base granular

Empleando la expresión anterior, se calculan los respectivos índices para el porcentaje de fresado analizado (50 %).

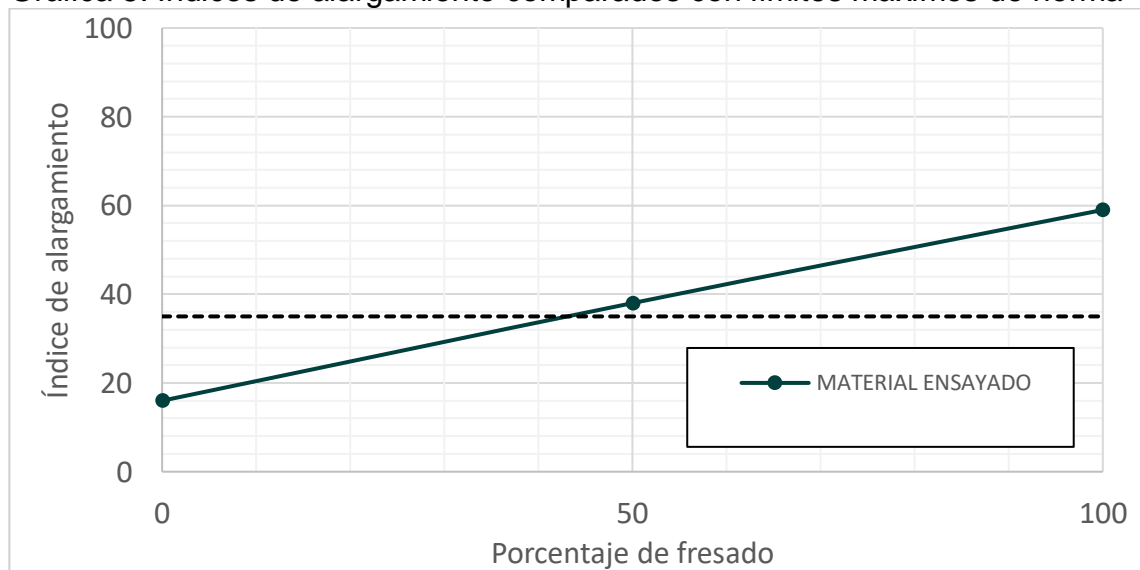
3.2.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos

Gráfica 4. Índices de aplanamiento comparados con límites máximos de norma



Fuente. Los Autores

Gráfica 5. Índices de alargamiento comparados con límites máximos de norma



Fuente. Los Autores

La base granular evaluada, cumple con los límites máximos de norma, mientras que el fresado y mezcla, sobrepasan dichos límites.

En las gráficas anteriores, los índices obtenidos, son proporcionales al porcentaje de fresado: un incremento de fresado, genera mayores índices de aplanamiento y alargamiento, lo cual, probablemente se deba al proceso de obtención del fresado, pues este proviene de la trituración (por máquina fresadora) de un pavimento existente, técnica que genera fragmentos con gradación y forma variables, limitando así, el control de calidad respecto al parámetro analizado.

3.3 CARAS FRACTURADAS. El porcentaje de partículas fracturadas, se determina con la siguiente expresión:

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$

Donde:

P: porcentaje de partículas con el número especificado de caras fracturadas (g).

N: masa o número de partículas en la categoría de no fracturadas que no cumplen con el criterio de partículas fracturadas (g).

F: masa con, al menos el número de caras fracturadas especificado (g).

Para determinar el porcentaje de caras fracturadas, se considera una cara, y en el caso de la mezcla, se realiza un promedio ponderado:

$$CF = \frac{(CF_F * F) + (CF_{BG} * BG)}{100}$$

Donde:

CF: porcentaje de caras fracturadas de la mezcla

CF_F: porcentaje de caras fracturadas del fresado

CF_{BG}: porcentaje de caras fracturadas de la base granular

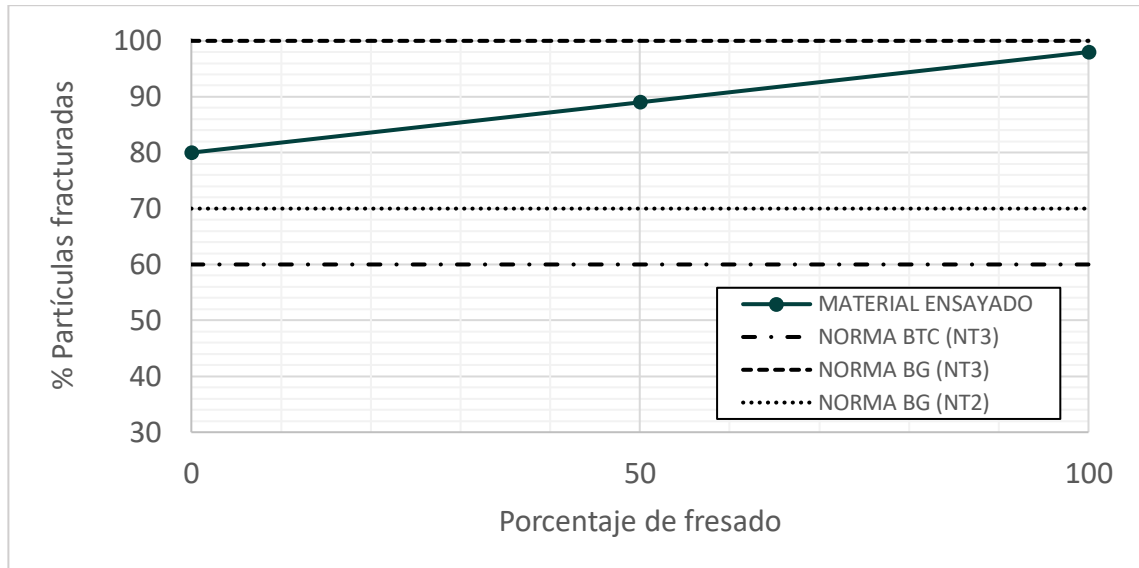
F: Porcentaje de fresado

BG: Porcentaje de base granular

3.3.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos

Los resultados del presente ensayo se encuentran compilados en la Gráfica 6

Gráfica 6. Porcentaje de partículas fracturadas con verificación de parámetros normativos



Fuente. Los Autores

Según la gráfica, ninguno de los materiales evaluados cumple los requerimientos de base granular para nivel de tránsito alto, sin embargo, cumplen como base granular para nivel medio y como base tratada con cemento para nivel alto.

Por otro lado, puede observar que un mayor porcentaje de fresado, genera mayores porcentajes de partículas fracturadas, lo que indica que, debido al proceso trituración ya mencionado, los granos generados, presentan fracturas en sus caras.

3.4 DESGASTE EN MÁQUINA DE LOS ÁNGELES. La base granular y la mezcla (fresado y base), se trabajaron con granulometría A (12 esferas); para el fresado, se optó por granulometría B (11 esferas).

La ecuación aplicada, es:

$$\text{Porcentaje de pérdidas} = \frac{P1-P2}{P1} * 100$$

Donde:

P1: masa de la muestra seca antes del ensayo (g).

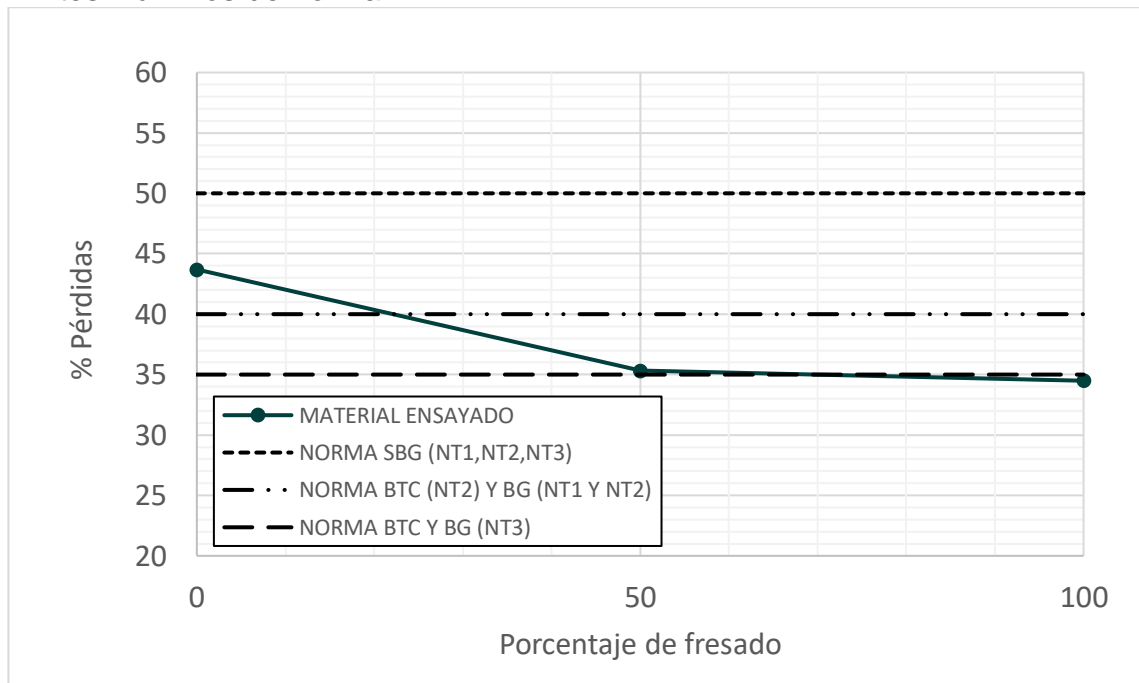
P2: masa de la muestra seca después del ensayo previo lavado sobre el tamiz No.12 (g).

3.4.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos

El fresado presentó un porcentaje de desgaste del 34,44 % con granulometría **B**, por ende, tiene una mayor resistencia al desgaste con respecto al material de base granular con un porcentaje de 43,70% con gradación **A**, pues entre menor sea el porcentaje de pérdidas de los agregados, mayor será la resistencia de estos. (Véase Gráfica 7)

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el ensayo, así mismo, se comparan estos con parámetros norma, con el fin de determinar a simple vista, los efectos que tiene en el desgaste un aumento del porcentaje de fresado que para este caso, es 50 %.

Gráfica 7. Pérdidas por desgaste en Máquina de los Ángeles comparadas con límites máximos de norma



Fuente. Los Autores

De la Gráfica 7, se concluye que el incremento de fresado, genera menores porcentajes de pérdidas por desgaste en máquina de los Ángeles, lo cual, puede deberse a que este material es un subproducto que proviene de un pavimento con determinado tiempo de operación y desgaste.

3.5 DEGRADACIÓN EN MICRO DEVAL

Se halla el porcentaje de pérdidas con la siguiente fórmula:

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

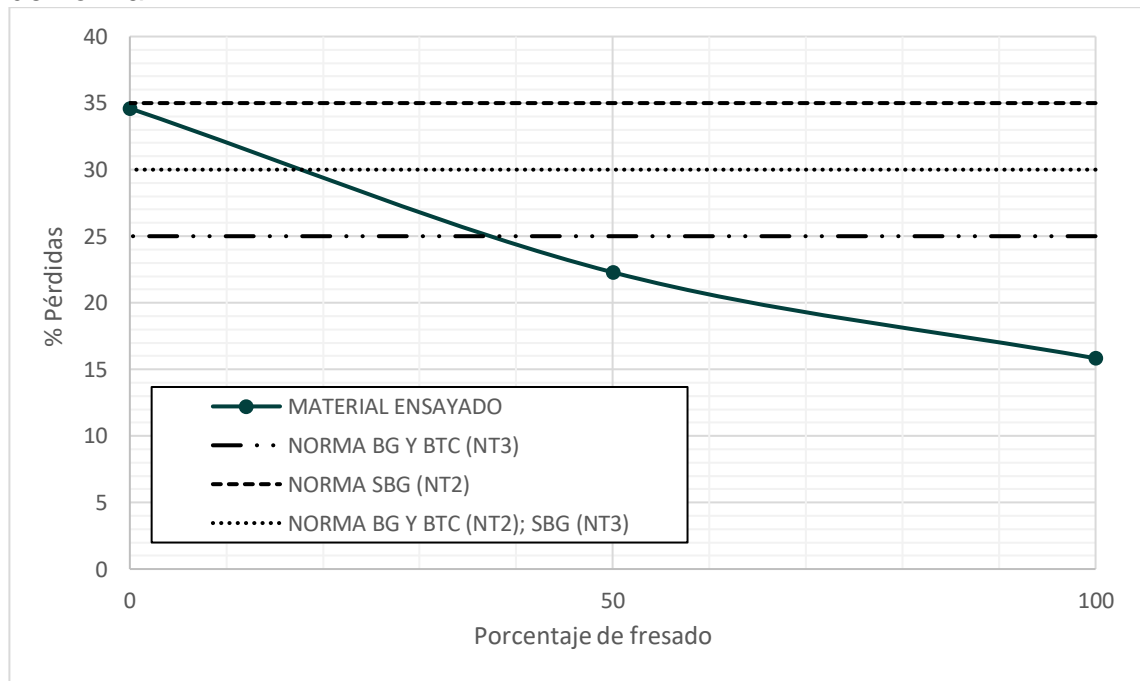
Donde:

A: masa de la muestra preparada antes de realizar el ensayo (g).

B: masa de la muestra seca después de realizar el ensayo (g).

3.5.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos

Gráfica 8. Pérdidas por desgaste en Micro Deval comparadas con límites máximos de norma



Fuente. Los Autores

Según los resultados obtenidos en laboratorio. La base granular tiene un porcentaje de pérdidas de 34.60%, lo cual indica que no cumple con los parámetros de calidad establecidos por el INVIAS ya que esta especifica un desgaste máximo de 25%.

El fresado, con un porcentaje de pérdidas del 15%, cumple con los parámetros de calidad del INVIAS ya que este especifica un desgaste máximo de 25%.

3.6 PROCTOR MODIFICADO

Para realizar los cálculos del presente ensayo, se emplearon las ecuaciones relacionadas a continuación:

-Humedad

$$W(\%) = \frac{w_h - w_s}{w_s - w_r} \times 100$$

Donde:

W: porcentaje de humedad.

w_h : peso de la muestra húmeda + recipiente (g).

w_s : masa de la muestra seca + recipiente (g).

w_r : masa del recipiente (g).

-Densidad húmeda

$$\rho_h = \frac{M_T - M_{MD}}{V}$$

Donde:

ρ_h : densidad húmeda

M_T : masa del suelo húmedo dentro del molde (g).

M_{MD} : masa del molde de compactación (g).

V: volumen del molde de compactación (cm^3).

-Densidad seca

$$\gamma_d = \frac{\rho_h}{1 + \frac{W}{100}} ; \quad \gamma_d = \frac{w_s}{V}$$

Donde:

γ_d : densidad seca (g/cm^3).

W: humedad (%).

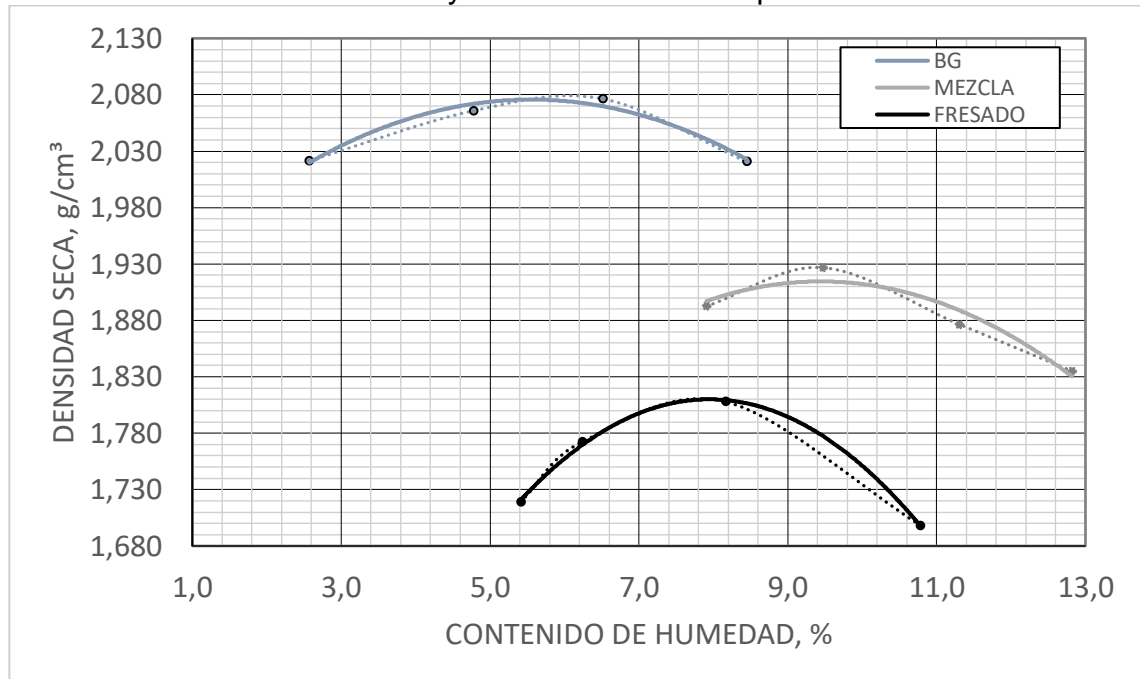
w_s : masa de la muestra seca (g).

V: volumen del molde de compactación (g/cm^3).

Para obtener el valor de densidad seca máxima ($\gamma_{d\text{máx}}$) y su respectivo valor de humedad óptima (Humedad óptima), se ajustó una curva polinómica de segundo orden.

3.6.1 Resumen de resultados con verificación de parámetros normativos

Gráfica 9. Resultados del ensayo modificado de compactación



Fuente. Los Autores

Según la gráfica de compactación (véase Gráfica 9), el material que genera mayor densidad seca, es la base granular ($\gamma_{d\text{máx}}= 2,076 \text{ g/cm}^3$; Humedad óptima= 5,5 %); la mezcla, presenta una densidad intermedia ($\gamma_{d\text{máx}}= 1,914 \text{ g/cm}^3$; Humedad óptima= 9,4 %), y por últimos, está el fresado con la menor densidad ($\gamma_{d\text{máx}}= 1,810 \text{ g/cm}^3$; Humedad óptima= 7,9 %).

Considerando estos resultados, es factible afirmar que el incremento de RAP (fresado), al ser este último un material poroso y con pocos finos, produce disminución en las densidades de compactación; por otro lado, causa una variación irregular (no proporcional) en la humedad correspondiente a una densidad máxima de las mezclas analizadas, ya que al aumentar el fresado al 50%, la humedad óptima también aumenta, sin embargo, al aplicar 100 % de fresado, esta disminuye (Humedad óptima BG = 5,5 % < Humedad óptima fresado = 7,9 % < Humedad óptima mezcla= 9,4 %).

3.7 CBR

Se debe considerar que los CBR se calculan a 2,54 mm y 5,08 mm (véase Anexo G) de penetración (esfuerzos de 6,9 MPa y 10,35 MPa respectivamente), la norma indica que se debe tomar el mayor valor resultante, que normalmente es CBR a 2,54 mm (0,1") de penetración, si el resultado es que el mayor es el de 5,08 mm (0,2"), se debe repetir el ensayo, si se vuelve a obtener el mismo resultado, se registra este como el valor de CBR. Sin embargo, en los ensayos realizados, se obtuvo que el mayor CBR era para 5,08 mm, pero no se repitió el ensayo en ninguna de las muestras, debido al tiempo limitado y el número de muestras. Cuando sucede esto, se dice que el suelo después de fallar, continúa ofreciendo resistencia a la penetración, lo común es que después de fallar, la resistencia disminuya.

Los resultados se resumen en las gráficas (*Gráfica 10, Gráfica 11 y Gráfica 12*) y para este parámetro, también se hace revisión de requisitos normativos.

Se aplican las ecuaciones:

-CBR

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_{ref}} \times 100$$

Donde:

σ_x : esfuerzo calculado para una deformación x (MPa).

σ_{ref} : esfuerzos de referencia (MPa)

-Grado de compactación

$$G_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dm\acute{a}x}} \times 100$$

Donde:

G_c : grado de compactación (%)

γ_d : densidad seca correspondiente al número de golpes respectivo (56, 25, 10), para cada material evaluado (g/cm^3).

$\gamma_{dm\acute{a}x}$: densidad seca máxima correspondiente al ensayo Proctor modificado en cada material evaluado (g/cm^3).

-Energía de compactación

$$\frac{N * n * w * h}{V}$$

Donde:

N: Numero de capas

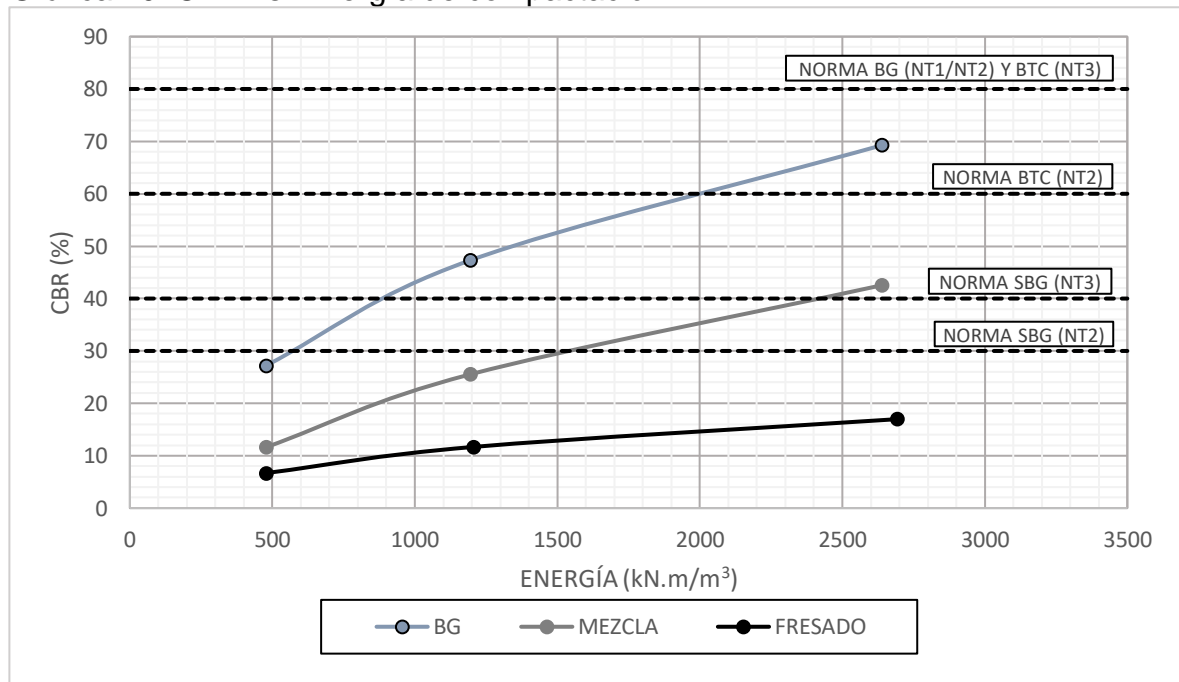
n: Numero de golpes

w: Peso del martillo (Kg)

h: Altura caída del martillo (cm)

V: Volumen de la muestra (cm³)

Gráfica 10. CBR vs. Energía de compactación



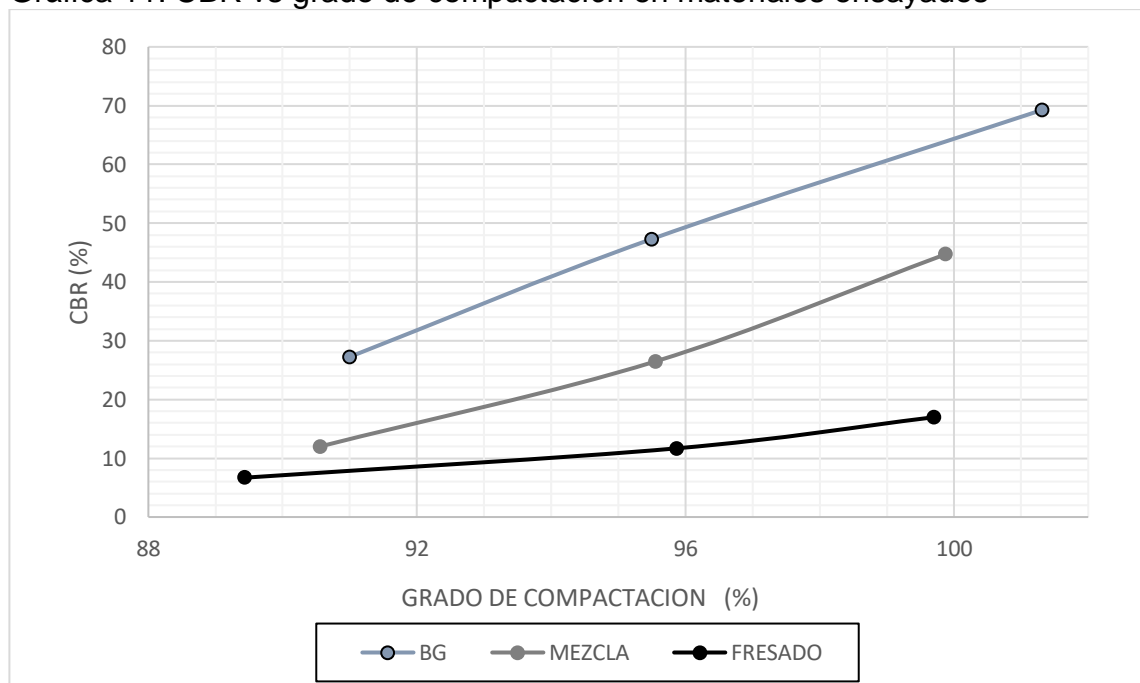
Fuente. Los Autores

En la gráfica de CBR vs. energía, se aprecia que un incremento de fresado genera menores pendientes, lo que quiere decir que, en el caso de la base granular, con una pendiente más pronunciada, la variación de la energía aplicada, produce cambios significativos en el CBR; por el contrario, en el caso del fresado, las variaciones de energía, generan pequeños cambios en el CBR.

En resumen, aplicar una mayor energía en la compactación cuando se emplea material fresado, no garantiza mejores resultados en cuanto a resistencia por CBR. ➤ Las gráficas de esfuerzo vs. penetración para 56, 25 y 10 golpes correspondientes a los materiales evaluados (0 % de fresado, 50 % de fresado y 100 % de fresado) se encuentran en los anexos *Anexo G*, *Anexo H*, *Anexo I*, *Anexo J*, *Anexo K*, *Anexo L*.

Posteriormente, se analiza la relación entre el grado de compactación (G_c) calculado y el CBR de los materiales. (Véase *Gráfica 11*).

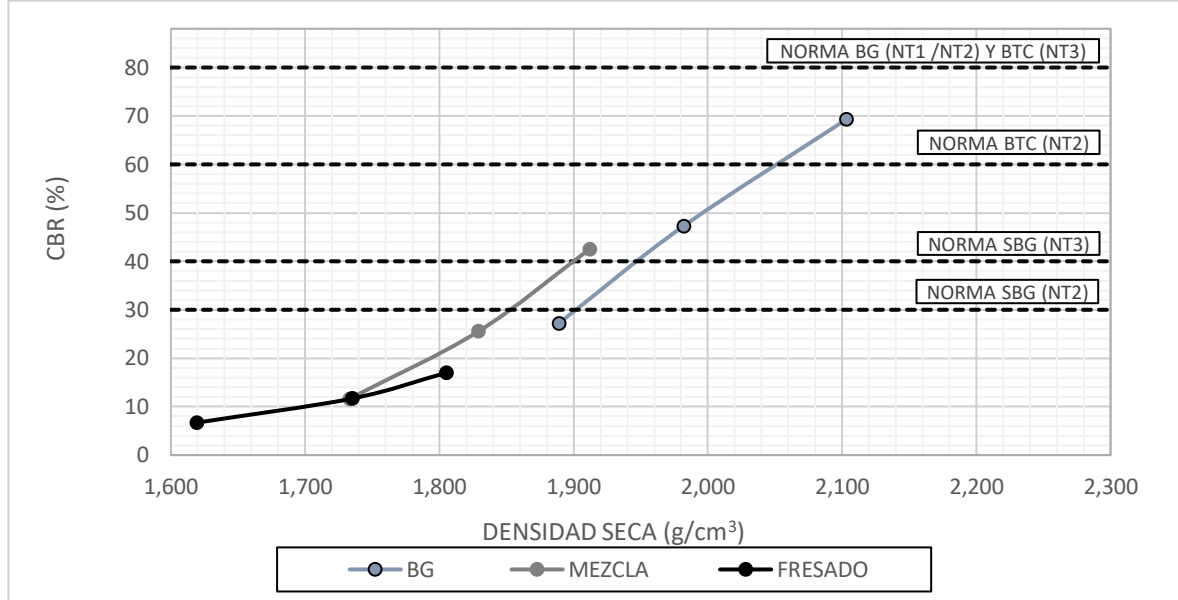
Gráfica 11. CBR vs grado de compactación en materiales ensayados



Fuente. Los Autores

Según la gráfica anterior, el CBR aumenta al incrementar el grado de compactación (aplicando mayor número de golpes), comportamiento que es predecible, puesto que al compactar más, la muestra resulta con una mayor densidad, por ende mayor resistencia.

Gráfica 12. CBR vs densidad seca, con revisión de límites mínimos de norma



Fuente. Los Autores

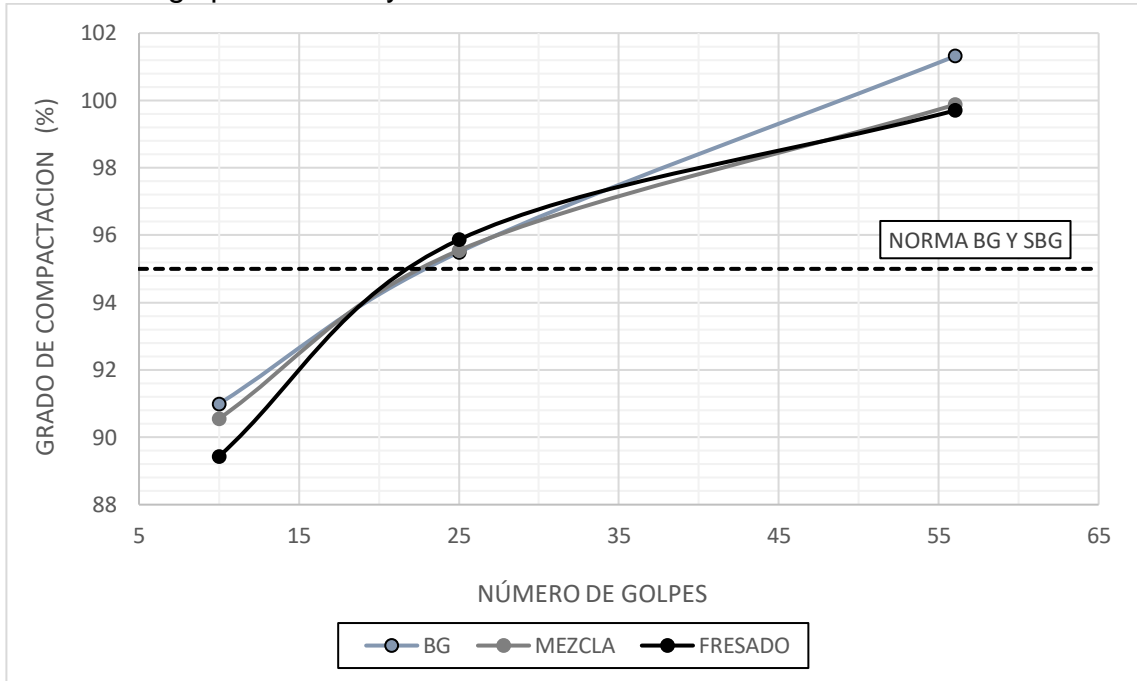
Considerando que la norma INVIAS, en agregados para *bases granulares (BG)*, exige *CBR mínimos: de 80 % para niveles de tránsito 1 y 2, y 95 % para nivel 3*; en la gráfica anterior, se evidencia que ninguno de los materiales evaluados, cumple estos límites, sin embargo, la base granular, satisface los requerimientos de agregados para otros usos: como base tratada con cemento de tránsito intermedio, con un rango aproximado de densidades entre 2,05 g/cm³ y 2,100 g/cm³; como subbase granular (NT3), con un rango de densidades mayor, entre 1,95 g/cm³ y 2,100 g/cm³.

Por otra parte, el fresado (100 % de fresado), genera bajos CBR, y no cumple los requisitos de norma para ningún tipo de capa granular (BG, SBG, BTC); mientras que la mezcla cumple como SBG en niveles de tránsito 2 y 3, observándose un rango de densidades para un tránsito medio (NT2): 1,85 g/cm³ - 1,91 g/cm³ (valores aproximados leídos en la gráfica #); y para NT3, se presenta un rango muy pequeño de 1,90 g/cm³ - 1,91 g/cm³.

Del análisis anterior, se concluye que la base empleada para la realización del ensayo, no presenta la calidad requerida de una base granular para pavimentos. Al mezclar el fresado con la base granular en partes iguales, se produce disminución de la resistencia medida por ensayo CBR, si bien esta mezcla, está lejos de satisfacer los parámetros de norma para bases granulares o tratadas con cemento, se puede emplear como subbase granular pero controlando rigurosamente la compactación.

También se hace la revisión del grado de compactación en los diferentes materiales:

Gráfica 13. Verificación de parámetros normativos de grado de compactación vs. número de golpes en ensayo CBR



Fuente. Los Autores

Como se evidencia en la *Gráfica 13*, el grado de compactación requerido lo alcanzan las muestras compactadas con 25 golpes o más, es fundamental realizar compactar adecuadamente, para así lograr el grado de compactación requerido.

3.8 EXTRACCIÓN DEL ASFALTO

La expresión aplicada para calcular el porcentaje de asfalto es:

$$\% \text{ Asfalto} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

Donde:

% Asfalto: porcentaje de asfalto.

P₁: masa de fresado inicial con asfalto (g).

P₂: masa de fresado después de centrifugación y secado (g).

Se obtiene el porcentaje de asfalto:

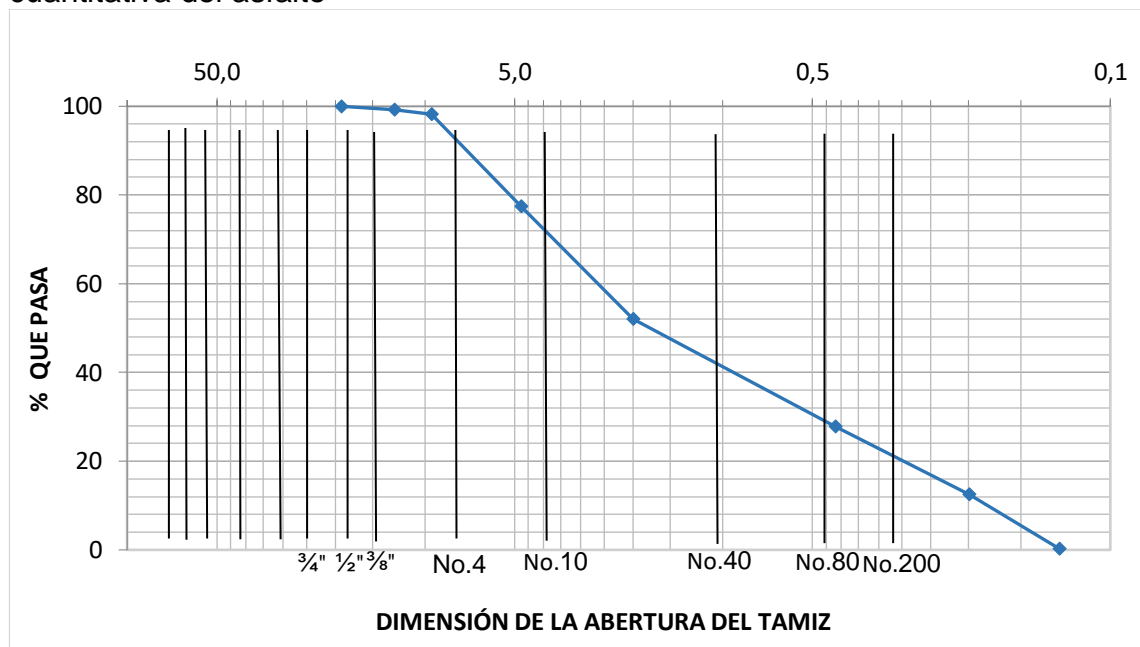
$P_1 = 1504 \text{ g}$

$P_2 = 1404,8 \text{ g}$

Asfalto = 6,60 %

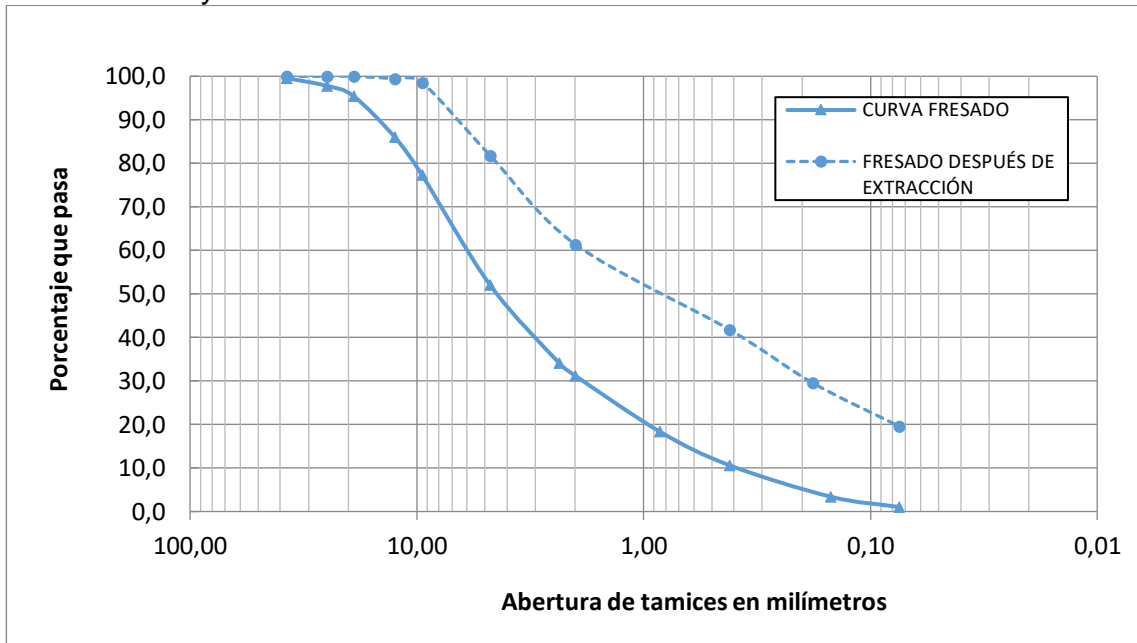
Posteriormente, se lava el material (P_2) con jabón y nuevamente se seca (en horno), se procede a realizar una granulometría y así generar una curva granulométrica (véase *Gráfica 14*).

Gráfica 14. Granulometría del fresado post centrifugación en ensayo de extracción cuantitativa del asfalto



Fuente. Los Autores

Gráfica 15. Comparación de granulometrías del fresado, antes y después de efectuar ensayo de extracción del asfalto



Fuente. Los Autores

En la Gráfica 15, se compara la granulometría inicial del fresado (véase Gráfica 2), antes de extraerle el asfalto, con la granulometría post extracción (véase Gráfica 14), y se observa un incremento de porcentaje de finos en esta última.

4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Con los resultados del capítulo anterior, se compilan las revisiones de calidad realizadas para cada ensayo, con base en los requisitos normativos para BTC del INVIAS, que es el objetivo del presente trabajo, pero dado que no cumple gran parte de los parámetros, adicional, se hace verificación para SBG Y SBG, en los diferentes niveles de tránsito (véase *Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19*), donde los recuadros de color rojo, significa que no cumple dicho parámetro, y los de color verde, indican que el material cumple.

Tabla 17. Verificación de parámetros INVIAS en los resultados de ensayos efectuados en la base granular

		SBG			BG			BTC	
		NT1	NT2	NT3	NT1	NT2	NT3	NT2	NT3
DESGASTE	ANGELES	Verde	Verde	Verde	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo
	MICRO DEVAL	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
FORMA	CARAS FRACTURADAS	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	APLANAMIENTO	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	ALARGAMIENTO	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
RESISTENCIA	CBR	Verde	Verde	Verde	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Verde

Fuente. Los Autores

Tabla 18. Verificación de parámetros INVIAS en los resultados de ensayos efectuados en el fresado

		SBG			BG			BTC	
		NT1	NT2	NT3	NT1	NT2	NT3	NT2	NT3
DESGASTE	ANGELES	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	MICRO DEVAL	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
FORMA	CARAS FRACTURADAS	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	APLANAMIENTO	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	ALARGAMIENTO	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
RESISTENCIA	CBR	Verde	Verde	Verde	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Verde

Fuente. Los Autores

Tabla 19. Verificación de parámetros INVIAS en los resultados de ensayos efectuados en la mezcla

		SBG			BG			BTC	
		NT1	NT2	NT3	NT1	NT2	NT3	NT2	NT3
DESGASTE	ANGELES	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	MICRO DEVAL	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
FORMA	CARAS FRACTURADAS	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	APLANAMIENTO	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	ALARGAMIENTO	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
RESISTENCIA	CBR	Verde	Verde	Verde	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Verde

Fuente. Los Autores

5.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

➤La sustitución de base granular por RAP con un porcentaje de 50 % de este:

-Mejora algunas propiedades físicas de la mezcla como: desgaste (en Ángeles y Micro Deval), pues debido al contenido de asfalto en este tipo de material, se genera una película protectora de la partícula; geometría o forma, ya que el fresado presenta altos porcentajes de caras fracturadas.

-Altera negativamente las propiedades mecánicas, pues un incremento de fresado, produce disminución en el CBR obtenido, debido a la ductilidad del RAP, pues este, al provenir de una carpeta asfáltica, presenta grandes deformaciones debido a las cargas aplicadas.

➤La base granular empleada, no cumple algunos parámetros de calidad como propiedades desgaste y resistencia que debería cumplir según el INVIAS.

➤En el ensayo de CBR, el grado de compactación, afecta considerablemente los CBR obtenidos, especialmente en la base granular; mientras que, en el fresado y la mezcla, un incremento de densidad, no genera un cambio importante en el CBR.

➤La disminución de densidad seca en el fresado, respecto a las base granular, para el mismo número de golpes, indica que el residuo estudiado, presenta un bajo porcentaje de finos y porosidad.

➤La mezcla, ofrece una resistencia de CBR admisible para subbases granulares, pero con un control riguroso de compactación, es decir, cumple, pero en un intervalo de compactaciones reducido.

➤La mezcla propuesta del 50 % de fresado, cumpliría los requisitos de subbase granular, es decir, teniendo en cuenta los parámetros analizados, es viable el reemplazo de RAP para conformar una subbase granular.

➤El reemplazo de agregado virgen por fresado para conformar bases granulares estabilizadas con cemento (BTC), para una mezcla de 50 % de fresado y 50 % de base granular, no es recomendable, puesto que no cumple los estándares de calidad mínimos de resistencia, ni algunos parámetros de propiedades físicas como índices de alargamiento y aplanamiento.

➤Se recomienda realizar los ensayos desarrollados en esta investigación, pero con otros porcentajes de fresado, puesto que, proponer una sola mezcla, limita la evaluación de parámetros e identificación de alternativas.

➤ Se debe reevaluar la idoneidad de los ensayos empleados para caracterizar el RAP en Colombia, ya que es frecuente obtener resultados que satisfagan las normas en un ensayo cualquiera (forma, tamaño de partículas, etc) con un suelo o agregado determinado, sin embargo, al realizar otros ensayos (CBR, módulo de resiliencia), ese mismo material presenta un deficiente comportamiento; o viceversa: materiales con altas resistencias y propiedades físicas reducidas, por ende se deben seleccionar los ensayos con coherencia, dando prioridad a ciertas propiedades, y considerando que el conjunto de ensayos que se realice, sea el adecuado para caracterizar acertadamente el material. Así mismo, es fundamental, aplicar los ensayos que den resultados más representativos o reales, es decir los que tengan una menor incertidumbre.

BIBLIOGRAFÍA

-Internet:

America's Cement Manufacturers. Cement – Treated Base(CTB) [Base tratada con cemento (BTC)] [en línea]. [Consultado: 25 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.cement.org/cement-concrete-applications/paving/cement-treated-base-ctb>

BUITRAGO ZARABANDA, Juan Felipe; GONZÁLEZ MÉNDEZ, Ashley Nataly. Caracterización del rap e identificación de su influencia en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente. Bogotá D.C. [en línea]. 2016. 207. [consultado: 20/03/2019]

Edward J. Hoppe, et al, Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use As Road Base and Subbase Material. En: Report on State Project. Enero del 2015

Introducción al reciclado de pavimentos asfálticos [en línea/PDF]. 20P. [Consultado: 20 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6624/06.pdf;jsessionid=583C26CFCA4854A352B6985B0E0DE407?sequence=7>

Luhr, David, et al Guía para la Recuperación de profundidad completa con cemento. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., 2005

MARCELO DE JESUS, EXPERTS [en línea]. en: tecnologías para aplicación de asfalto fresado (RAP) [Consultado: 26/03/2019].

SUAREZ DÍAZ, Estabilización de suelos [seminario/ PDF]. Bucaramanga, Colombia. 51p.. [Consultado: 28 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/40-estabilizacion-de-suelos.html?download=430:414-estabilizacion-de-suelos>

-Libro con edición:

RONDON, Hugo Alexander .Pavimentos materiales, construcción y diseño.-1ª.ed.-. Bogotá: Ecoe Ediciones,2015. P.608

SÁNCHEZ SABOGAL, Fernando. Fundamentos teóricos guías para el diseño. Tomo1. 1ra ed. Bogotá, Colombia. 1984. 501p.

VARIOS AUTORES. Manual de reciclado en frío Wirtgen [en línea/ PDF]. 2ed. Alemania: Copyright por Wirtgen GmbH. 2004. 272p. ISBN 3-936215-08-1. [Consultado: 16 de marzo de 2019].Disponible en internet: <https://docplayer.es/98239631-Wirtgen-manual-de-reciclado-en-frio.html>

- Norma:

INVIAS. Capítulo 1-Aspectos generales [en línea]. En: INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Colombia. 2013. 70p. [Consultado: 17 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>

INVIAS. Capítulo 3-Afirmados, subbases y bases [en línea]. En: INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Colombia. 2013. 70p. [Consultado: 15 de noviembre de 2019]. Disponible en internet: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>

INVIAS. La rehabilitación de pavimentos, otro tema de estudio a profundidad, **[en línea]. Instituto nacional de vías. 07/09/2012. parrafo3.** [consultado: 20/03/2019].

MINISTERIO DE TRANSPORTE; INVIAS. Manual de mantenimiento de carreteras [en línea]. Vol.2. Colombia. 2016. 530p [pdf]. [Consultado: 9 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7714-manual-de-mantenimiento-de-carreteras-2016-v2/file>

-Revista:

American Journal of Engineering and Applied Science [Revista Americana de Ingeniería y Ciencias Aplicadas]. Egipto. Febrero - septiembre, 2015.

R. Taha, A. Al-Harthy, K. Al-Shamsi, and M. Al-Zubeidi. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases. En: Journal of materials in civil engineering [Revista de materiales de ingeniería civil]. Sultanate of Oman [Sultanato de Omán, Asia]. Mayo - junio, 2002. .[pdf]. [consultado: 20/03/2019].

Saud A. Sultan, Zhongyin Guo. Evaluating the performance of sustainable perpetual pavements using recycled asphalt pavement in China. En: International Journal of Transportation Science and Technology. 9 de Enero de 2017.

Siksha Swaroopa KAR1, Aravind Krishna SWAMY2, Devesh TIWARI3, Pramod Kumar JAIN4. Impact of recycled asphalt pavement on properties of foamed bituminous mixtures. En: The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 18 de septiembre de 2019

THENOUX, Guillermo. Study of techniques of cold recycling: second part (stages of a cold recycling Project UIT emulsion) volumen 1, (enero /2000)

YUE HUAN YANG, YING BIAO WU. advanced characterization of asphalt and concrete materials. **[en línea]**. mix design for full-depth reclaimed asphalt pavement with cement as stabilizer. 09/09/15. pagina 1. [pdf]. [consultado: 20/03/2019].

ANEXOS

Anexo A. Índices de aplanamiento por fracción y global de la base granular (0 % de fresado)

Tamaño	Masa fracción (g)	Masa partículas planas(g)	Índices	
3/8"	1249	272	22	IAi índice de aplanamiento para cada fracción
1/2"	1255	278	22	
3/4"	1250	197	16	
1"	1251	403	32	
TOTAL (g)	5005	1150	23	IA índice de aplanamiento global

Fuente. Los Autores

Anexo B. Índices de aplanamiento por fracción y global del fresado (100 % de fresado)

Tamaño	Masa fracción (g)	Masa partículas planas(g)	Índices	
3/8"	1296,5	1070	83	IAi índice de aplanamiento para cada fracción
1/2"	1255	1021	81	
3/4"	1330	960	72	
1"	1336,6	1176	88	
TOTAL (g)	5218,1	4226,7	81	IA índice de aplanamiento global

Fuente. Los Autores

Anexo C. Índices de aplanamiento promedio por fracción y global de la mezcla (50 % de fresado)

Índices promedio	
52	IA _i índice de aplanamiento para cada fracción
52	
44	
60	
52	IA índice de aplanamiento global

Fuente. Los Autores

Anexo D. Índices de alargamiento por fracción y global de la base granular (0 % de fresado)

Tamaño	Masa fracción (g)	Masa partículas largas(g)	Índices	
3/8"	1249	240	19	IL _i índice de alargamiento para cada fracción
1/2"	1255	203	16	
3/4"	1250	179	14	
1"	1251	194	16	
TOTAL (g)	5005	816	16	IL índice de alargamiento global

Fuente. Los Autores

Anexo E. Índices de alargamiento por fracción y global del fresado (100 % de fresado)

Tamaño	Masa fracción (g)	Masa partículas largas(g)	índices	
3/8"	1296,8	1084,6	84	ILi índice de alargamiento para cada fracción
1/2"	1255,2	794,5	63	
3/4"	1330	746,5	56	
1"	1336,4	456,6	34	
TOTAL (g)	5218,4	3082,2	59	IL índice de alargamiento global

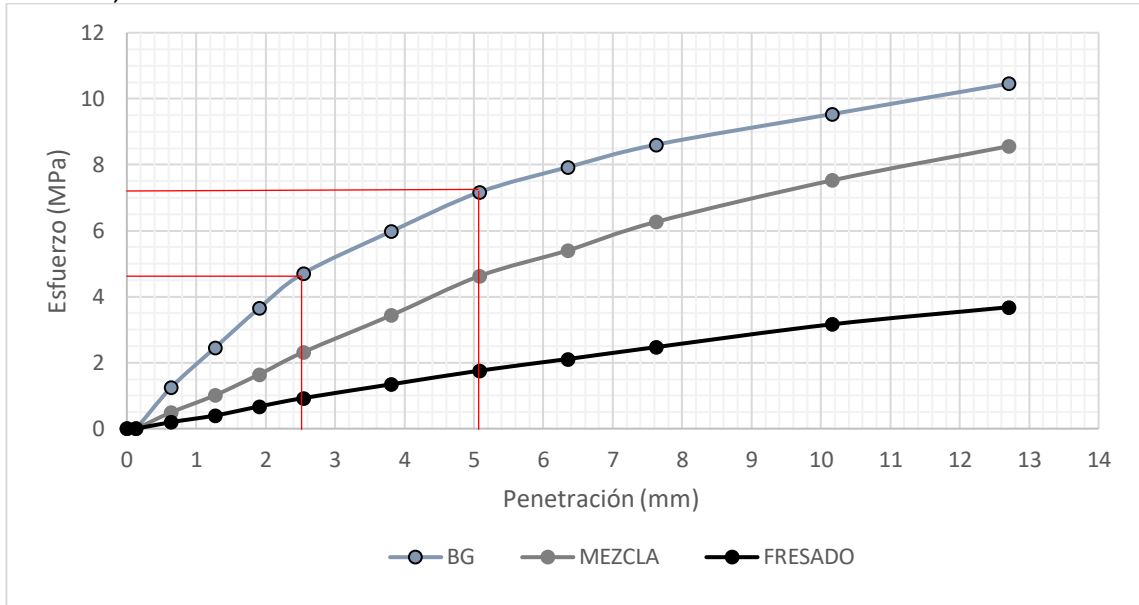
Fuente. Los Autores

Anexo F. Índices de alargamiento promedio por fracción y global de la mezcla

índices promedio	
51	IAi índice de aplanamiento para cada fracción
40	
35	
25	
38	IA índice de aplanamiento global

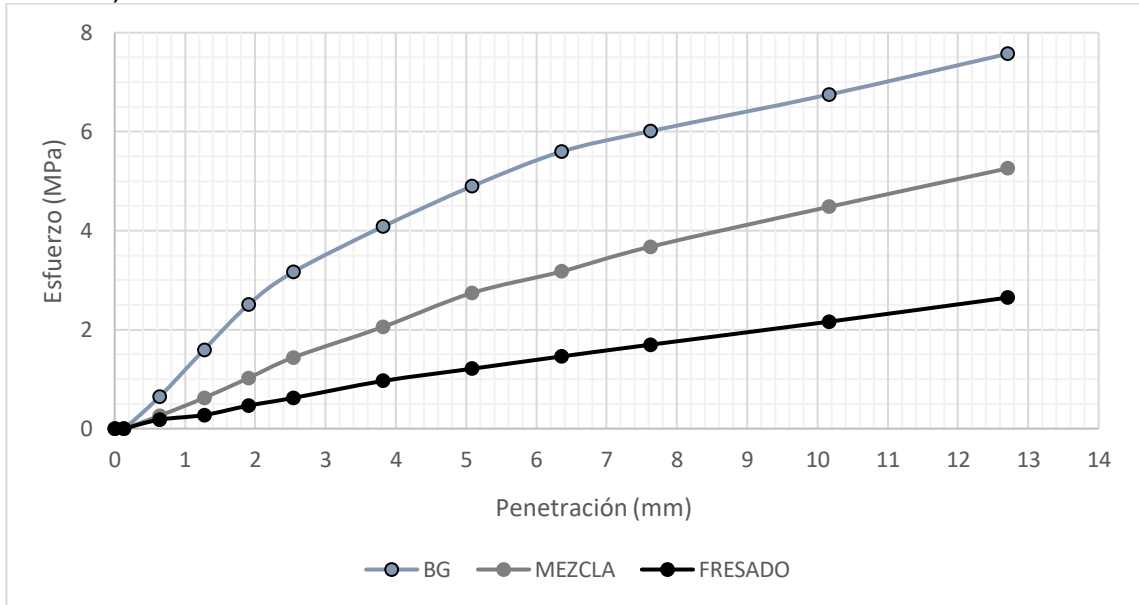
Fuente. Los Autores

Anexo G. Esfuerzo vs penetración en ensayo CBR, 56 golpes (BG, mezcla y fresado)



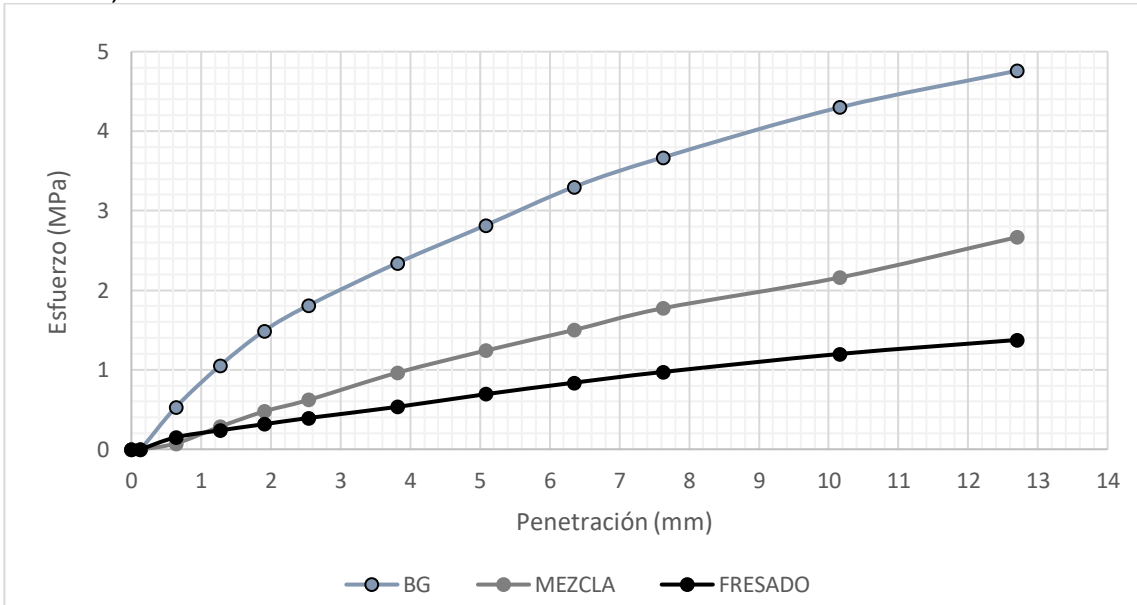
Fuente. Los Autores

Anexo H. Esfuerzo vs penetración en ensayo CBR, 25 golpes (BG, mezcla y fresado)



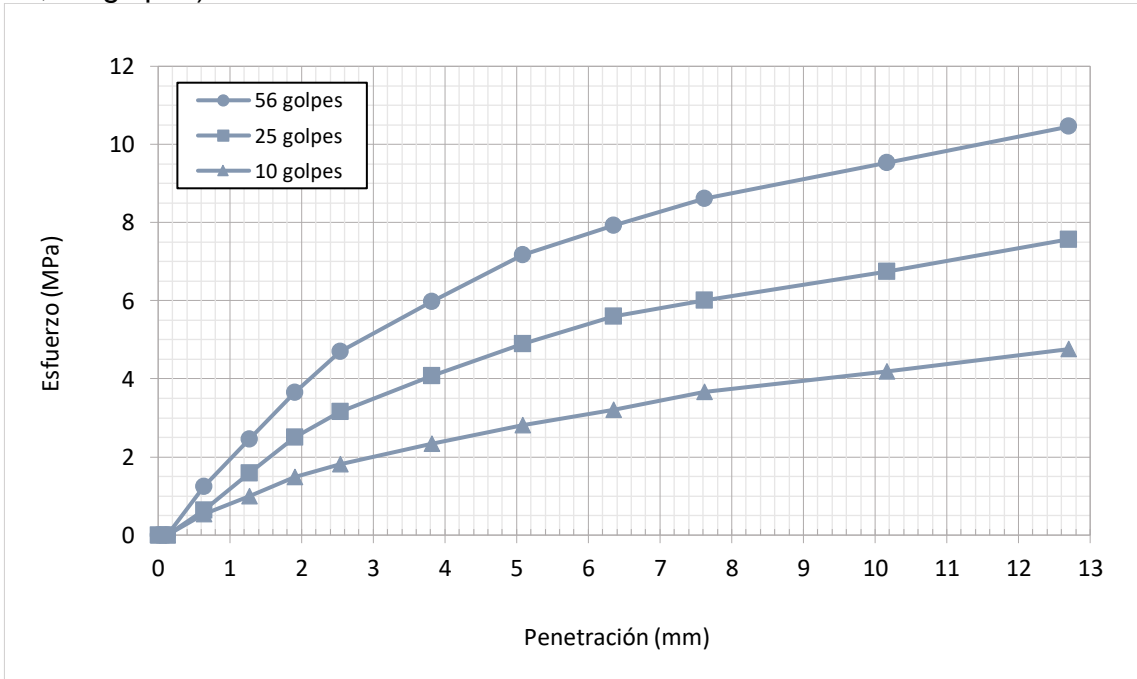
Fuente. Los Autores

Anexo I. Esfuerzo vs penetración en ensayo CBR, 10 golpes (BG, mezcla y fresado)



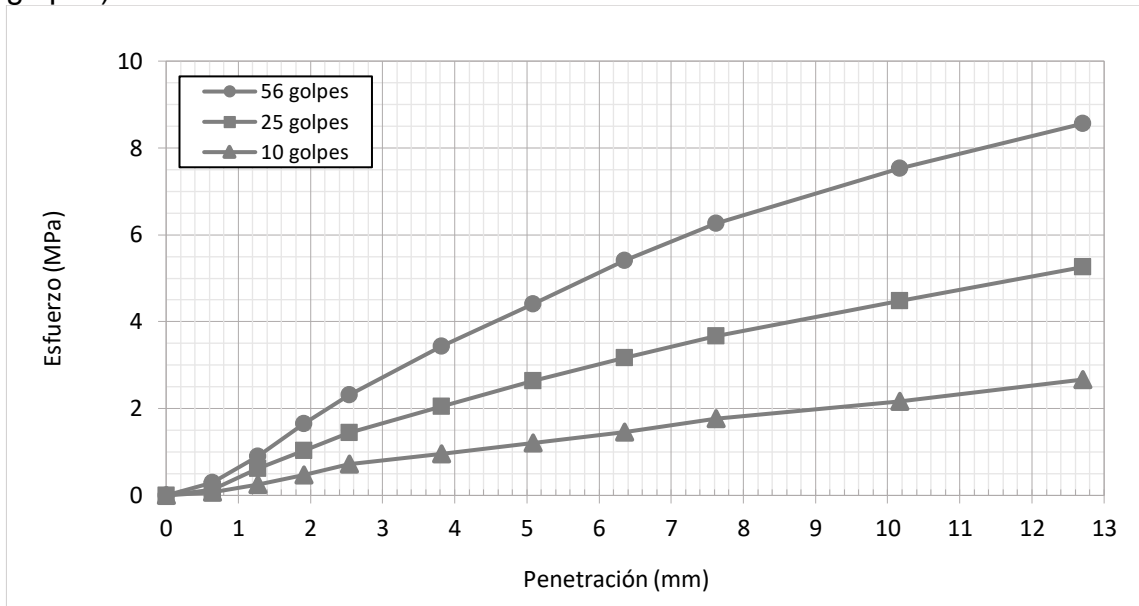
Fuente. Los Autores

Anexo J. Esfuerzo vs. penetración en ensayo de CBR para la base granular (56, 25, 10 golpes)



Fuente. Los Autores

Anexo K. Esfuerzo vs. penetración en ensayo de CBR para la mezcla (56, 25, 10 golpes)



Fuente. Los Autores

Anexo L. Esfuerzo vs. penetración en ensayo de CBR para el fresado (56, 25, 10 golpes)

