

**COMPARACIÓN ENTRE UN DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO CONVENCIONAL
Y UNO UTILIZANDO MACADAM COMO ESTRUCTURA DE SOPORTE**

ALEXANDRA VALENCIA REY

DIEGO OSORIO GAMBOA



UNIVERSIDAD PONTICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS TERRESTRES

BUCARAMANGA

2018

**COMPARACIÓN ENTRE UN DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO
CONVENCIONAL Y UNO UTILIZANDO MACADAM COMO ESTRUCTURA DE
SOPORTE**

ING. ALEXANDRA VALENCIA REY

ING. DIEGO OSORIO GAMBOA

Trabajo de grado para optar por el título de Especialista en Vías Terrestres

Director:

MSc. GERARDO BAUTISTA GARCIA



UNIVERSIDAD PONTICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ESPECIALIZACIÓN EN VÍAS TERRESTRES

BUCARAMANGA

2018

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado.

Firma del jurado.

Firma del jurado.

Bucaramanga, 20 de Marzo de 2018

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

21 de marzo de 2018

Diego Osorio Gamboa

Alexandra Valencia Rey

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firmas:

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	12
1	OBJETIVOS	13
1.1	OBJETIVO GENERAL	13
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
2	JUSTIFICACIÓN	14
3	ALCANCE	15
4	ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES	16
4.1	PAVIMENTO RÍGIDO.....	16
4.2	DISEÑO DE PAVIMENTO RIGIDO	16
4.3	PROPIEDADES DE LA SUBRASANTE.....	18
4.4	HISTORIA DEL MACADAM.....	18
5	MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
5.1	Caracterización física de materiales	21
5.1.1	Agregado grueso.....	21
5.1.2	Recebo	24
5.2	INSTALACIÓN EN OBRA.....	24
5.3	METODOLOGÍA	27
6	RESULTADOS DE ENSAYOS Y ANÁLISIS	30
6.1	GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO.....	30
6.2	RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE AGREGADOS GRUESO POR ABRACIÓN E IMPACTO EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES	31
6.3	ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO.....	32
6.4	PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN AGREGADO GRUESO	33
6.5	GRANULOMETRÍA DEL RECEBO	33
6.6	LIMITE LÍQUIDO DEL RECEBO E ÍNDICE PLASTICO DEL RECEBO	35
6.7	EQUIVALENTE DE ARENA, INV -133-13.....	35
7	DISEÑO DE PAVIMENTOS	37
7.1	Factores de diseño.....	37

7.1.1	Resistencia a la flexión del módulo de rotura, MR:	37
7.1.2	Resistencia de la subrasante o del conjunto subrasante - subbase (k):.....	37
7.1.3	Tipos, frecuencias y magnitudes de las cargas por ejes esperadas.	44
7.1.4	El periodo de diseño	45
7.2	DISEÑO DEL PAVIMENTO	45
8	ANÁLISIS FINANCIERO	52
9	CONCLUSIONES.....	55
10	RECOMENDACIONES	56
11	NUEVAS PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN	57
12	BIBLIOGRAFIA	58
13	ANEXOS.....	59
13.1	GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO	59
13.2	DESGASTE EN MÁQUINA DE LOS ÁNGELES DEL AGREGADO GRUESO	59
13.3	PARTÍCULAS FRACTURADAS DEL AGREGADO GRUESO	60
13.4	APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO DEL AGREGADO GRUESO	60
13.5	GRANULOMETRÍA DEL RECEBO.....	61
13.6	EQUIVALENTE DE ARENA Y LÍMITES LIQUIDO Y PLÁSTICO	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Granulometrías del agregado grueso del macadam (Ministerio de Fomento de España, 2002)	19
Tabla 2. Metodología de ensayos del proyecto.	28
Tabla 3. Análisis granulométrico del agregado grueso	30
Tabla 4. Granulometría del agregado grueso en estudio y del PG-3	30
Tabla 5. Índice de aplanamiento del agregado grueso	32
Tabla 6. Índice de alargamiento del agregado grueso	32
Tabla 7. Análisis granulométrico del recebo	33
Tabla 8. Granulometría del recebo en estudio y requisitos del PG-3	34
Tabla 9. Módulos de reacción obtenidos en el trabajo “Determinación del módulo de reacción (k) para el conjunto de capa triturada y sub-rasante” (Acevedo & Henao, 2017)	42
Tabla 10. Módulos de reacción combinado subbrasante – subbase (Montejo, 1998).....	43
Tabla 11. Datos de tránsito para el diseño de pavimento	44
Tabla 12. Distribución de vehículos comerciales y repeticiones esperadas	45
Tabla 13. Factores de diseño	45
Tabla 14. Cálculo del espesor del pavimento rígido.....	50
Tabla 15. Costo de equipos de trituración	52
Tabla 16. Costo de producción de la subbase, extendida y compactada.	52
Tabla 17. Utilidad de la subbase.....	52
Tabla 18. Costo de producción de la base, extendida y compactada.	53
Tabla 19. Utilidad de base	53
Tabla 20. Costo de producción del macadam, extendido y compactado.	53
Tabla 21. Utilidad del macadam	54
Tabla 22 Costo de los materiales (únicamente suministro).....	54
Tabla 23. Costo de materiales en canteras de la zona de Bucaramanga	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Terrenos geológicos de Colombia. (Gomez & Almanza, 2015)	22
Figura 2. Plancha 5-06 del Mapa Geológico de Colombia 2015. (Gomez & Almanza, 2015)	23
Figura 3. Agregado grueso de la investigación. Fuente: propia.	24
Figura 4. Recebo de la investigación. Fuente: propia.....	24
Figura 5. Preparación de la superficie de asiento del macadam. Fuente: propia.....	25
Figura 6. Extendido de agregado grueso. Fuente: propia	25
Figura 7. Compactación del agregado grueso. Fuente: propia	26
Figura 8. Extensión del recebo. Fuente: propia.....	26
Figura 9. Humectación y compactación del recebo. Fuente: propia	27
Figura 10. Acabado final del macadam. Fuente: propia.....	27
Figura 11. Metodología del trabajo de grado.....	29
Figura 12. Granulometría del agregado grueso y límites M2 (PG-3)	31
Figura 13. Granulometrías de la muestras de ensayo, Tabla 219-1 (INVIAS, 2013).	31
Figura 14. Granulometría del recebo y límites del PG-3	34
Figura 15. Recebo en estudio	35
Figura 16. Lectura de equivalente de arena.....	36
Figura 17. Tabla 320-2 de las especificaciones técnicas del INVIAS, requisitos para la sub- base granular. (INVIAS, 2013).....	39
Figura 18. Variación del coeficiente a_3 con diferentes parámetros de la resistencia de la subbase (Montejo, 1998)	39
Figura 19. Módulo de reacción compuesto. Grafica 4-4 de la Guía para diseño de estructura de pavimentos (AASHTO, 1993)	40
Figura 20. Módulo de reacción combinado utilizando el aplicativo de la ACPA.....	41
Figura 21. Módulo de reacción combinado según el libro “Ingeniería de pavimentos para carreteras” (Montejo, 1998)..... ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 24. Correlación entre el módulo de reacción k y el CBR (Sanchez, 2010).....	43
Figura 23. Grafica para el cálculo del módulo de reacción del material.....	44
Figura 24. Esfuerzo equivalente – sin berma de concreto (Montejo, 1998).....	46

Figura 25. Análisis de fatiga – Cargas admisibles con base en el factor de relación de esfuerzos (con y sin berma) (Montejo, 1998).	47
Figura 26. Factores de erosión. Trabazón de agregados y sin bermas (Montejo, 1998).	48
Figura 27. Cargas admisibles son base en el factor de erosión (Sin berma) (Montejo, 1998).	49
Figura 28. Estructura del pavimento rígido diseñado	51

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: COMPARACIÓN ENTRE UN DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO CONVENCIONAL Y UNO UTILIZANDO MACADAM COMO ESTRUCTURA DE SOPORTE

AUTOR(ES): ALEXANDRA VALENCIA REY, DIEGO OSORIO GAMBOA

PROGRAMA: Esp. en Vías Terrestres

DIRECTOR(A): GERARDO BAUTISTA GARCIA

RESUMEN

La utilización de nuevos materiales para ser implementados en el diseño y construcción de pavimentos rígidos provee nuevas ideas y metodologías de trabajo que permiten generar soluciones factibles en proyectos de infraestructura. Los perfiles estratigráficos y formaciones geológicas de la provincia de García Rovira son propicios para la obtención de material rocoso con propiedades físicas de alta resistencia; por lo cual, se contempla el aprovechamiento de los recursos en la zona para proyectos de construcción. Particularmente para la construcción de carreteras se puede producir un material denominado macadam que sirve como soporte y puede reemplazar a los granulares convencionales, base y subbase. En la presente monografía se realizaron ensayos de caracterización físico-mecánica al macadam de origen de la provincia de García Rovira, Santa Fe. Los resultados se compararon con los requerimientos del Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3, normativa española donde se tiene estandarizado el uso de este material. Una vez caracterizado el macadam se planteó el diseño de dos estructuras de pavimento rígido para el escenario de tránsito y subrasante. Un diseño contemplaba el uso de subbase de CBR 30% como material de soporte de la losa de concreto, y el otro el uso de macadam. Se halló que el módulo elástico de estos materiales era el mismo, por tanto, su módulo de reacción combinado era igual en los dos casos. Como consecuencia, la estructura de pavimento diseñada, mediante la metodología de la PCA, fue equivalente en los dos casos. Adicional a lo anterior se realizó un análisis económico del costo de usar la subbase granular fabricada en plantas cercanas a pescadero y el material macadam en proceso de fabricación in situ; dando como resultado un costo menor y beneficio en la producción del macadam para la estructura de pavimento rígido.

PALABRAS CLAVE:

Pavimento rígido, agregado grueso, macadam, diseño, módulo de reacción.

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: COMPARISON BETWEEN ONE CONVENTIONAL RIGID PAVEMENT DESIGN AND ONE USING MACADAM AS A SUPPORT STRUCTURE

AUTHOR(S): ALEXANDRA VALENCIA REY, DIEGO OSORIO GAMBOA

FACULTY: Esp. en Vías Terrestres

DIRECTOR: GERARDO BAUTISTA GARCIA

ABSTRACT

The use of new materials to be implemented in the design and construction of rigid pavements provides new ideas and work methodologies that allow generating feasible solutions in road projects. The stratigraphic profiles and geological formations of the province of García Rovira are favorable for the obtaining of rocky material with physical properties of high resistance; therefore, the use of resources in the area for construction projects is contemplated. Particularly for the construction of roads, a material called macadam can be produced that serves as a support, replacing the conventional granular, base and subbase. In the present work of degree the physical-mechanical characterization tests were carried out to the macadam of origin of the province of García Rovira, Santander. The results were compared with requirements of the General Technical Specifications for road and bridge works PG-3, Spanish regulations where the use of this material is standardized. Once the macadam was characterized, the design of two rigid pavement structures was proposed for the same transit and subgrade scenario. One design contemplated the use of CBR 30% subbase as support material for the concrete slab, and the other the use of macadam. It was found that the elastic modulus of these two materials was the same, therefore, their combined reaction module was the same in both cases. Consequently, the pavement structure designed, using the PCA methodology, was equivalent in both cases. In addition to the above, an economic analysis was made of the cost of using the granular subbase manufactured in plants near the fishmonger and the macadam material in the process of manufacturing in situ; resulting in lower cost and profit in the production of macadam for the rigid pavement structure

KEYWORDS:

Rigid pavement, coarse aggregate, macadam, design, reaction module.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la infraestructura vial en Colombia en el transcurso de los años ha presentado avances significativos que han permitido una inversión considerable en zonas rurales alejadas, el gobierno nacional ha implementado diferentes programas estratégicos de obras públicas con el fin de promover un desarrollo social y económico entre las regiones más apartadas e interconectarlas, generando de esta manera productividad y grandes beneficios a municipios.

Partiendo del hecho que cada proyecto es particular, es importante realizar, desde su planeación, un análisis técnico y económico detallado de los diferentes aspectos que interactúan en su ejecución. Algunos de estos son los materiales y métodos constructivos que utilizar. En el momento de revisar las opciones, es necesario dar un vistazo global a la necesidad e investigar soluciones de nivel mundial que puedan adaptarse al medio.

Este proyecto se basa en la comparación del uso de dos materiales como material de soporte de una losa de concreto, pavimento rígido. El primer material es una subbase convencional de CBR 30%, estandarizada por las especificaciones del INVIAS. El otro es un material llamado macadam, el cual fue caracterizado bajo las especificaciones de una normativa española (Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes). De esta manera se realiza un análisis comparativo del aporte de los dos materiales a la estructura. Además, se realizó un estudio económico acerca de la opción de implementarlos en algún proyecto de infraestructura vial.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar los espesores de las capas de las estructuras de cada diseño de pavimento rígido: 1) pavimento rígido convencional, 2) pavimento rígido con macadam como material de soporte.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar los resultados obtenidos en los ensayos con base en los requerimientos del artículo 502 del Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes - PG-3.
- Diseñar dos estructuras de pavimento rígido, una convencional y otra utilizando macadam, caracterizado, como estructura de soporte, para un mismo escenario de tránsito y subrasante.

2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen proyectos viales ubicados en zonas alejadas de canteras y plantas de producción de materiales de construcción que hacen su desarrollo económicamente inviable. El transporte de materiales, movimientos de grandes volúmenes de excavación, estabilización de taludes y estructuras de contención son algunas de las actividades que hacen que la pavimentación de vías terciarias y secundarias requieran grandes inversiones.

Pensando en el mejor aprovechamiento de los recursos existentes en los sectores de los proyectos, incluso de los materiales producto de la excavación, se elaboró un material que cumple con los requerimientos de capacidad portante de la estructura de pavimento. Este material es el Macadam, el cual contiene rocas, producto de excavación que son machacadas, y un recebo arenoso.

Un paso preliminar a la implementación del macadam es su estudio y diseño de pavimentos donde se tengan en cuenta sus características físico mecánicas. Por esta razón, en este trabajo de grado se caracterizó el macadam de origen de García Rovira, Santander, comparando sus propiedades con los requerimientos del “Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes - PG-3”.

Para llegar a utilizar el macadam en algún proyecto de construcción, particularmente de infraestructura vial, es fundamental realizar un análisis económico que permita evaluar, desde el punto de vista financiero, su aplicación. Este fue el último paso que se hizo en esta monografía.

Este trabajo de grado, motiva a la búsqueda y caracterización de granulares que puedan ser utilizados en proyectos particulares y que apoyados en normativas internacionales permitan el desarrollo práctico y genere ahorros en los mismos.

3 ALCANCE

El presente proyecto de grado centra su alcance en realizar dos diseños de pavimento rígido donde el material de soporte de la losa de concreto es diferente en cada uno, subbase y macadam, respectivamente. Previo a esto se analizaron los resultados de los ensayos de caracterización físico mecánica y capacidad de soporte del Macadam producido en la provincia de García Rovira – Santander, para ser utilizado como parte de la estructura de pavimento rígido. Esto fundamentado en los requerimientos exigidos en el Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes - PG-3.

Adicional a lo anterior, se comparó, desde el punto de vista económico, el uso de cada uno de los materiales de soporte.

Como beneficio de esta investigación se da una visión general y alternativas recurrentes para la búsqueda de nuevas modelaciones y acciones en el campo del diseño estructural de pavimentos rígidos, permitiendo así que se desarrollen conocimientos y se promuevan nuevas metodologías de trabajo.

4 ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

4.1 PAVIMENTO RÍGIDO

Es una estructura de concreto hidráulico que puede ser simple o reforzada, soportada sobre una capa granular o directamente sobre la subrasante, su principal característica es su rigidez y alto módulo de elasticidad, lo cual hace que las tensiones que llegan a la subrasante sean bajas. (Montejo, 1998)

ESTRUCTURA PAVIMENTO

La estructura de pavimento rígido está compuesta básicamente por las siguientes capas:

Subrasante: Es la capa de apoyo en el pavimento y presenta como función principal el soporte de las cargas en la estructura; de igual manera es un factor clave en la determinación del espesor del pavimento, para evaluar la calidad de la subrasante es necesario recurrir a ensayo de módulo de la subrasante.

Subbase: Es la capa intermedia entre la estructura de pavimento rígido y la subrasante, consiste en una o varias capas de material granular compactadas y tiene como función principal la de formar una superficie que soporte la losa de pavimento y facilite su instalación, esta capa no tiene fin estructural ya que la losa debe ser lo suficientemente rígida para soportar las cargas generadas por el tráfico.

Losa de concreto: Provee una superficie de rodamiento adecuada que resiste los efectos abrasivos del tráfico ya que está en continuo contacto con él. Puede llegar a ser desde losas de concreto simple (donde no se coloca acero de refuerzo, todos los esfuerzos producidos por el tráfico, los absorbe el concreto), hasta pavimentos de concreto con refuerzo continuo, donde el acero soporta las deformaciones incluyendo las generadas por la temperatura. (Londoño, Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto, 2004)

4.2 DISEÑO DE PAVIMENTO RIGIDO

Existen varios métodos para el diseño de pavimentos rígidos, los más utilizados en la práctica son:

METODO DE DISEÑO PCA:

En el estudio de diseño de pavimentos rígidos se encuentra la metodología de diseño propuesta por la PCA, el cual está basado en los enunciados Westergaard, Pickett y Ray, y se complementa con la teoría de elementos finitos, en el cual no solo tuvo en cuenta el concepto de fatiga (mantiene los esfuerzos del concreto debido a la acción de cargas

repetidas), sino también la erosión (limita la deflexión del pavimento) como factor para la durabilidad de la estructura. (Sanchez, 2010)

El método que utiliza la PCA (Portland Cement Association), permite encontrar los esfuerzos y deformaciones que se producen en las losas de concreto apoyadas sobre el suelo.

El procedimiento para diseñar pavimentos rígidos por el método PCA está basado en: estudios teóricos sobre el comportamiento de losas, fórmulas de Westergaard, ábacos de Pickett & Ray, comportamiento de las juntas, efectos de la berma.

Dentro de los parámetros que rige la metodología de diseño de pavimentos rígidos PCA consta de cuatro factores principales que son:

Resistencia del concreto a la flexión:

De acuerdo con (Montejo, 1998) esta resistencia se considera en el procedimiento de diseño por el criterio de fatiga. Este parámetro define principalmente los resultados de los esfuerzos y la resistencia a la flexión definida para el diseño del pavimento.

Soporte de la subrasante y la subbase:

El parámetro evalúa la resistencia de la subrasante mediante el ensayo de placa directa, el módulo de reacción (K) es el parámetro que permite evaluar las condiciones de soporte en la estructura del pavimento.

Periodo de diseño:

Es el periodo para definir el diseño de un pavimento y viene asociado a un valor numérico en años de diseño que viene asociado al espesor del pavimento a definir.

Tránsito:

Este factor hace referencia al número y la magnitud de las cargas por eje más pesadas que se esperan durante el periodo de diseño. Estos valores se obtienen mediante conteos y proyecciones de los tipos de vehículos, según el escenario planteado en cada proyecto (Montejo, 1998).

METODO DE DISEÑO AASHTO

El método fue desarrollado en Estados Unidos en la década de 1960, se basa en resultados experimentales que se obtuvieron en casi dos años de trabajo, en vías de tramos de prueba ubicados en el estado de Illinois, donde se obtuvieron relaciones, tablas, gráficos y formulas.

El método de AASHTO se basa en el concepto de serviciabilidad como una medida de su capacidad de brindar una capa de rodadura en buen estado para sus usuarios. Su ecuación se basa en la pérdida del índice de Serviciabilidad (APSI), durante su servicio. (Sanchez, 2010)

4.3 PROPIEDADES DE LA SUBRASANTE

MODULO RESILIENTE SUBRASANTE

El módulo resiliente de la subrasante evalúa las propiedades del suelo al ser sometidos a ciclos repetitivos de cargas, se logra determinar mediante el ensayo triaxial dinámico, este ensayo está determinado por la norma AASHTO T 724 y consiste en someter una probeta a un número dado de ciclos de carga axial, con magnitud, frecuencia y duración especificados usando el equipo para el ensayo triaxial. (Londoño, Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto, 2004)

Cuando el ensayo no se realice se presenta una correlación entre el módulo resiliente (MR) y el valor del CBR específico del suelo.

ENSAYO DE PLACA DIRECTA

El ensayo de placa directa es un mecanismo utilizado en los pavimentos rígidos para obtener el módulo de reacción de la subrasante. Este ensayo está definido por la normativa AASHTO T-222 a través del valor de la presión de aplicada en la placa de concreto y las deflexiones del suelo, la placa de carga se somete a cargas con incrementos significativos para definir las deformaciones de la subrasante y el módulo de reacción. (Sanchez, 2010)

4.4 MACADAM

En la construcción de carreteras se han presentado nuevas ideas, proceso y materiales propicios para desarrollar y preservar las carreteras. Uno de estos materiales es el Macadam, que data de la época de los años 1800 y se nombra así en honor a John Loudon McAdam, quien desarrolló su implementación. McAdam fue un ingeniero escocés que generó temáticas de construcción y reparación de carreteras. Presentó entre sus principales publicaciones los siguientes libros: "Practical Essay on the Scientific Repair and Preservation of Roads" (McAdam, 1819).

Dentro de los rasgos del pavimento definido por el Ingeniero escocés John Mcadam precisa particularmente la implementación del material macadam para la estructura de soporte del pavimento, generando a una altura diferente de la subrasante un espesor considerable con la utilización de esta capa de piedra utilizada.

El primer pavimento de macadam fue construido en el año 1823 en EE. UU, Maryland. Estaba compuesto por tres capas de rocas compactadas, en las cuales aumentaba el tamaño de los áridos con la profundidad. La primera era un cimiento de piedras gruesas hincadas a mano, la segunda era una capa de regulación de piedras ordenadas y apisonadas a mano, y la capa de rodadura era de unos 8 cm de espesor, con áridos de una pulgada machacados con maceta y colocadas mediante una paleta, asegurando un bombeo del 3%. En los

laterales existían unos encintados en piedra que impedían que las partículas de la capa de rodadura se perdieran. (Bañon, 2002)

Se define como *macadam* el material constituido por un conjunto de áridos de granulometría discontinua, que se obtiene extendiendo y compactando un árido grueso cuyos vacíos se rellenan con un árido fino, llamado recebo (Ministerio de fomento de España, 2002).

CONDICIONES GENERALES

De acuerdo con el ministerio de vías de España en su publicación de Pliegos de prescripciones técnicas generalas para obras de carreteras y puentes, edición número 3, se han establecido como condiciones generales de diseño de macadam lo siguiente:

El árido grueso procederá del machaqueo y trituración de piedra de cantera, o grava natural, en cuyo caso deberá contener, como mínimo, un setenta y cinco por ciento (75%), en peso, de elementos machacados que presenten dos (2) o más caras de fractura. El árido se compondrá de elementos limpios, sólidos y resistentes, de uniformidad razonable, exentos de polvo, suciedad, arcilla u otras materias extrañas. En la Tabla 1 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las granulometrías propuestas en el (Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes)

Tabla 1. *Granulometrías del agregado grueso del macadam (Ministerio de Fomento de España, 2002)*

CEDAZOS UNE	Cernido Ponderal Acumulado %			
	M1	M2	M3	M4
100	100	-	-	-
90	90-100	-	-	-
80	-	100	-	-
63	-	90-100	100	-
50	-	-	90-100	100
40	0-10	0-10	-	80-90
25	-	-	0-10	-
20	0-5	0-5	-	0-10
12,5	-	-	0-5	0-5

Por otro lado, el recebo es una arena limpia, la cual como característica no presenta dentro de sus rasgos plasticidad, es utilizada para llenar los espacios vacíos entre el macadam.

ESTRUCTURA MACADAM

La construcción del Pavimento con macadam presenta como estructura la realización de capas de piedra y grava trituradas puestas de forma adecuada y recreando un esqueleto de

piedra en conjunto, dejando unos espacios vacíos los cuales se llenan de material con una granulometría específica, llamado recebo. Esto se hace con el fin de proporcionar cohesión a la estructura, para que no presente vacíos los cuales pueden llegar a incidir en la superficie y presentar un desgaste. (Construction Industry Development Board, 2005).

CARACTERISTICAS

Los pavimentos realizados con material macadam proporcionan una alta resistencia al corte; el desarrollo de la estructura de pavimento macadam presenta un drenaje optimo en las diversas capas construidas mejorando las condiciones de la estructura y permitiendo que no se sature.

El espesor del macadam está considerado bajo espesores no menores a 15 cm y en raras ocasiones superará los 30 cm. En el proceso constructivo antes de comenzar la ejecución del macadam se deberá comprobar que la capa subrasante este previamente compactada. (Dal-Re, 1996).

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE MATERIALES

El macadam fabricado está compuesto por agregado grueso, rocas producto de la excavación machacadas, y recebo como material llenante que disminuye la cantidad de vacíos. Las proporciones de los dos materiales constituyentes del macadam es de 75% del agregado grueso y 25% de recebo, en peso.

5.1.1 Agregado grueso

Origen del agregado: La provincia de García Rovira se encuentra ubicada en el departamento de Santander, ver Figura 1. Geológicamente está ubicada en el terreno Chibcha, entendiéndose por terreno como un fragmento de litosfera que hace parte o que fue generado encima de una placa, mediante un proceso que se llama acreción.

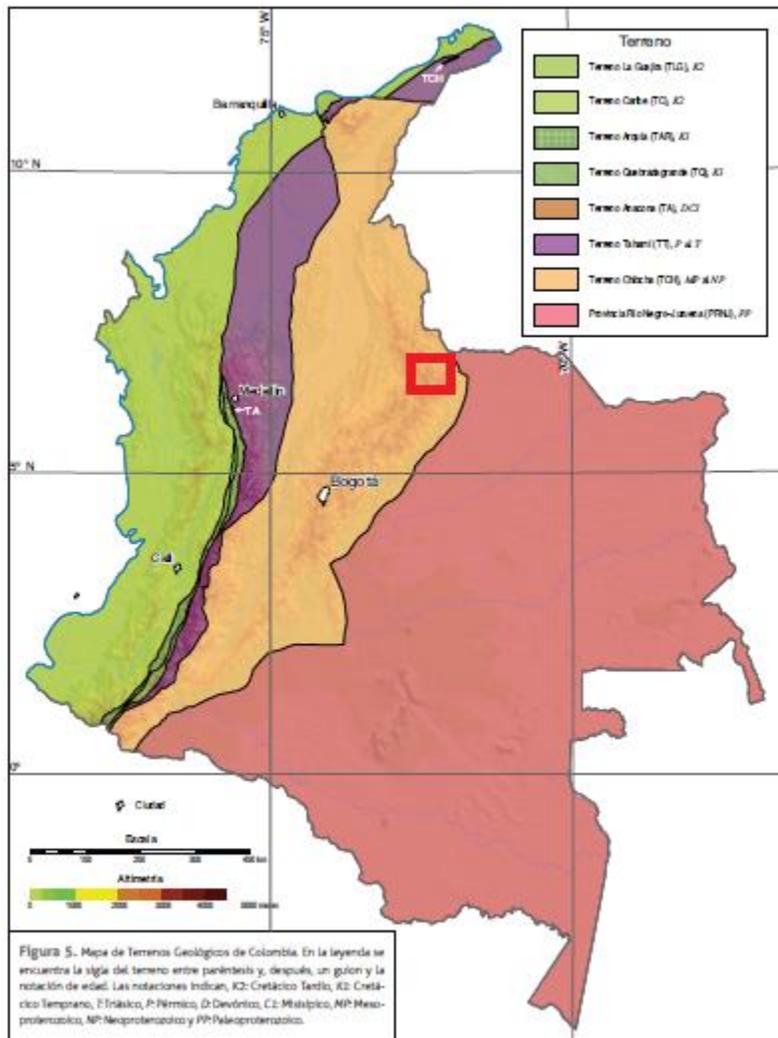


Figura 1. Terrenos geológicos de Colombia. (Gomez & Almanza, 2015)

En la plancha 5-06 (Figura 2) del mapa geológico colombiano, se puede observar que la zona donde se está excavando el material para utilizar como agregado grueso tiene una estratigrafía fanerozoico, predominando estratos jurásico y cretácico del mesozoico, donde se destacan rocas ígneas.

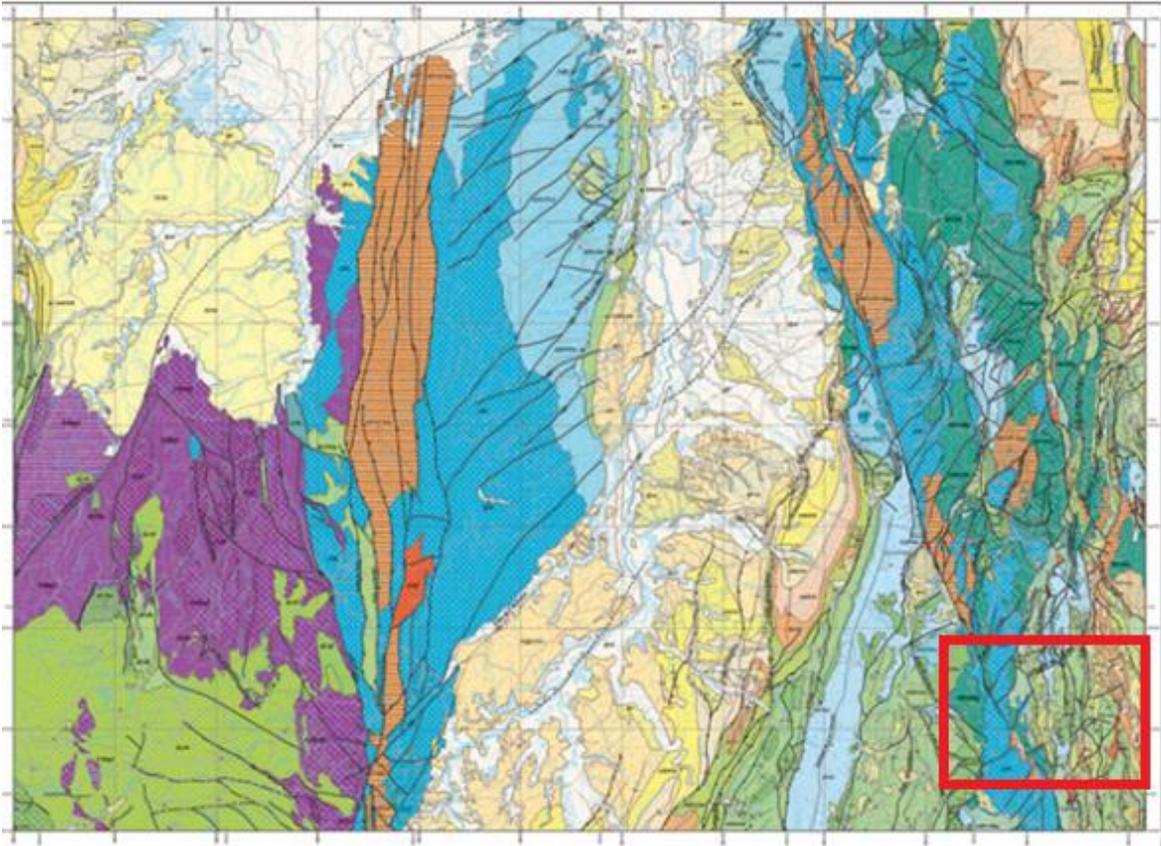


Figura 2. Plancha 5-06 del Mapa Geológico de Colombia 2015. (Gomez & Almanza, 2015)

En el capítulo 6 se muestra la caracterización realizada al agregado grueso, granulometría, resistencia a la degradación en la máquina de los ángeles, índice aplanamiento, alargamiento y caras fracturadas, debido a que estos resultados son parte de la presente investigación. En la Figura 3 se observa la muestra de material utilizada en los ensayos mencionados anteriormente.



Figura 3. Agregado grueso de la investigación. Fuente: propia.

5.1.2 Recebo

Origen del material: el recebo o agregado fino es material de arrastre de la quebrada la Judía, provincia García Rovira, Santander, el cual es el resultado del proceso de selección natural que sufre el material pétreo al ser transportado por las corrientes de agua del río. Dicho proceso, además del estudio de la geología de la zona, son un respaldo para la utilización de este material cómo agregado fino del macadam.

Una vez extraído el material del lecho del río se preselecciona para que todo pase por el tamiz #4, obteniendo un llenante adecuado. En la Figura 4 se observa la muestra de recebo utilizado en los ensayos de granulometría, índice plástico, límite líquido y equivalente de arena, descritos en el capítulo 6.



Figura 4. Recebo de la investigación. Fuente: propia

5.2 INSTALACIÓN EN OBRA

Con base en el numeral 502.3 “Ejecución de las obras” del PG-3 se describe el procedimiento de instalación del macadam:

1. Se prepara la superficie de asentamiento del macadam (ver Figura 5), de tal manera que cumpla con la densidad y niveles exigidos en las especificaciones del proyecto. Si en dicha superficie existen irregularidades que excedan las tolerancias especificadas, se deben corregir hasta garantizar su correcto estado.



Figura 5. Preparación de la superficie de asiento del macadam. Fuente: propia

2. Una vez comprobada la superficie de asiento, se procede a la construcción de la capa de macadam. El agregado grueso se extiende en capas de espesor uniforme, entre diez (10) y veinte (20) centímetros. Ver Figura 6.



Figura 6. Extendido de agregado grueso. Fuente: propia

3. Después de extendida la capa, se compacta longitudinalmente, comenzando por los bordes exteriores, progresando hacia el centro, y solapándose en cada recorrido un ancho no inferior a un tercio ($1/3$) del elemento compactador. La compactación se continua hasta que el agregado grueso quede perfectamente trabado y no se

produzcan corrimientos, ondulaciones o desplazamientos delante del compactador. Ver Figura 7.



Figura 7. Compactación del agregado grueso. Fuente: propia

4. Cuando el agregado grueso haya quedado perfectamente encajado, se procede a rellenar sus huecos con el recebo. Se extienden capas delgadas y uniformes, que se compactaran y regaran con agua, hasta conseguir su inclusión entre el agregado grueso, ver Figura 8. Esta operación puede facilitarse utilizando cepillos o escobas de mano. En caso de utilizar elementos vibratorios la cantidad de material de la capa se dispondrá así: primero un (50%), luego una capa entre el 35% y el 45%, finalizando con el material restante, ver Figura 9.



Figura 8. Extensión del recebo. Fuente: propia



Figura 9. Humectación y compactación del recebo. Fuente: propia

5. El acabado final del macadam se realiza con rodillos estáticos. Ver Figura 10.



Figura 10. Acabado final del macadam. Fuente: propia

5.3 METODOLOGÍA

Explotados los materiales constituyentes del macadam, agregado grueso y recebo, se llevaron muestras a la Universidad Pontificia Bolivariana. Una vez en el laboratorio, se dispusieron en un horno para trabajarlas en estado seco.

Según lo establece el Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, PG-3, se realizaron los ensayos expuestos en la Tabla 2 para cada material :

Tabla 2. Metodología de ensayos del proyecto.

Material	Ensayos	Norma
Agregado Grueso	• Granulometría	
	• Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles	• INV E – 213 – 13 • INV E – 219 – 13.
	• Índice de aplanamiento y alargamiento	• INV E – 230 – 13
	• Caras fracturadas	• IINV E – 227 – 13
Recebo o agregado fino	• Granulometría	• INV E – 213 – 13
	• Limite liquido e índice plástico	• INV E – 230 – 13
	• Equivalente de arena	• INV E - 133 – 13
Macadam	• Placa dinámica	• ASTM 2835

Seguido a la realización de los ensayos se procede a el análisis de resultados, basado en las especificaciones del PG-3.

De forma resumida se presenta la metodología del presente trabajo de grado en la



Figura 11. Metodología del trabajo de grado.

6 RESULTADOS DE ENSAYOS Y ANÁLISIS

6.1 GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO

En la Tabla 3 se muestra la granulometría del agregado grueso, determinada por tamizado según la norma INV E – 213 – 13. El peso de la muestra fue de 60 kg, como lo establece la norma mencionada.

Tabla 3. Análisis granulométrico del agregado grueso

Tamices		Retenido				Pasa en muestra total	
Pulgadas	mm	Parcial (gr)	Porcentaje (%)	Total (gr)	Porcentaje (%)	Total (gr)	Porcentaje (%)
3	75	0	0.00%	0	0.00%	60000	100.00%
2.5	63	6660	11.10%	6660	11.10%	53340	88.90%
2	50	21460	35.77%	28120	46.87%	31880	53.13%
1.5	37.5	24860	41.43%	52980	88.30%	7020	11.70%
1	25	6840	11.40%	59820	99.70%	180	0.30%
0.75	19	180	0.30%	60000	100.00%	0	0.00%

El módulo de finura de este material es de 0.53%.

En la Tabla 4. Granulometría del agregado grueso en estudio y del PG-3 se muestran los límites inferior y superior de las granulometrías permitidas por el PG-3, y la obtenida en el agregado grueso de estudio.

Tabla 4. Granulometría del agregado grueso en estudio y del PG-3

Tamices (mm)	Muestra Estudio	Granulometrías PG-3							
		M1 Li-Ls		M2 Li-Ls		M3 Li-Ls		M4 Li-Ls	
100		100%							
90		90%	100%						
75	100%	100%							
63	89%			90%	100%	100%			
50	53%					90%	100%	100%	
37.5	12%	0%	10%	0%	10%	80%		90%	
25	0%					0%	10%		
19		0%	5%	0%	5%			0%	10%
12.5						0%	5%	0%	5%

Se observa que la granulometría del agregado grueso de estudio tiene una distribución prácticamente similar a la del M2 del PG-3. El tamaño máximo es 75 mm y el mínimo es de 25 mm. El porcentaje que pasa en el tamiz de 63 mm es de 89%, bastante cercano a los límites (90%-100%) de la M2 del PG-3. De igual forma sucede en el tamiz de 37.5 mm, donde pasa el 12% y los límites de son 0% y 10%. Ver Figura 12

Granulometría del agregado grueso y límites M2 (PG-3)

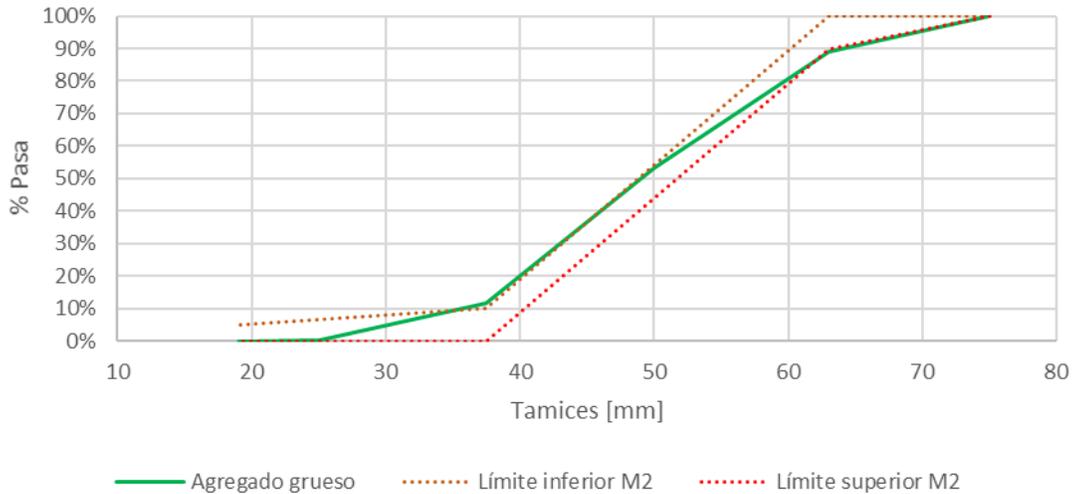


Figura 12. Granulometría del agregado grueso y límites M2 (PG-3)

6.2 RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE AGREGADOS GRUESO POR ABRACIÓN E IMPACTO EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

Para determinar el desgaste en la máquina de los ángeles se utilizó una muestra de 10000 g distribuido en las fracciones granulométricas señaladas en la Figura 13, que fue sometida a la carga abrasiva de 12 esferas en 1000 revoluciones, como lo especifica la norma INV E – 219 – 13.

Tabla 219 - 1. Granulometrías de las muestras de ensayo

TAMAÑO DEL TAMIZ		MASA DE LAS FRACCIONES, g		
PASA	RETIENE	GRANULOMETRÍAS		
		1	2	3
75 mm (3")	63 mm (2½")	2500 ± 50	5000 ± 50	5000 ± 25
63 mm (2½")	50 mm (2")			
50 mm (2")	37.5 mm (1½")		5000 ± 25	
37.5 mm (1½")	25 mm (1")		5000 ± 25	
25 mm (1")	19 mm (¾")		5000 ± 25	
Total		10 000 ± 100	10 000 ± 75	10 000 ± 50

Figura 13. Granulometrías de las muestras de ensayo, Tabla 219-1 (INVIAS, 2013).

Una vez aplicada la carga abrasiva se lavó sobre el tamiz No. 12, obteniendo una masa de 6136 g.

El desgaste obtenido fue:

$$\text{Desgaste} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa final}}{\text{masa inicial}} * 100 = \frac{10000 - 6682}{10000} * 100 = 33.18\%$$

Según el numeral 502.2.2.1.3 del PG-3 el desgaste en la máquina de los ángeles debe ser menor a 35%. El resultado obtenido para el material ensayado fue de 33.18%, por tanto, cumple el requerimiento de la norma mencionada

6.3 ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO

Según la INV E – 230 – 13, en el ensayo de índice de aplanamiento se tienen en cuenta las partículas que tienen tamaño entre $\frac{1}{4}$ " y $2\frac{1}{2}$ ". En la Tabla 5 se muestra el cálculo de este índice por fracción granulométrica y el global.

Tabla 5. Índice de aplanamiento del agregado grueso

Tamiz (Pulg)	Retenido parcial (g)	Partículas Aplanadas (g)	Índice aplanamiento
2	21460	1460	6.80%
1.5	24860	3820	15.37%
1	6840	2860	41.81%
0.75	180	0	0.00%
Índice de aplanamiento global			15.26%

En el ensayo de índice de alargamiento se tienen en cuenta las partículas que tienen tamaño entre $\frac{1}{4}$ " y 2 ". En la Tabla 6 se muestra el cálculo de este índice por fracción granulométrica y el global.

Tabla 6. Índice de alargamiento del agregado grueso

Tamiz (Pulg)	Retenido parcial (g)	Partículas Alargadas (g)	Índice aplanamiento
1.5	24860	900	3.62%
1	6840	0	0.00%
0.75	180	0	0.00%
Índice de alargamiento global			2.82%

Las partículas planas y alargadas son propensas a la rotura y desintegración durante el proceso de compactación, modificando la granulometría del agregado y afectando adversamente su comportamiento y durabilidad.

A pesar que en el PG-3 no se establece ninguna restricción del porcentaje de partículas aplanadas y alargadas, en su análisis se tendrá en cuenta que en el artículo 330 de las normas y especificaciones 2012 del INVIAS el índice de alargamiento y aplanamiento de las partículas de la Base granular es máximo 35%.

Los índices de aplanamiento y alargamiento, 15.26% y 2.86% respectivamente, del material en estudio cumplen a cabalidad con la especificación mencionada en el párrafo anterior. Que las partículas tengan estos índices es generado fundamentalmente por el origen del material, rocas producto de excavación machacadas.

6.4 PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN AGREGADO GRUESO

Se calculó el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso, según la norma IINV E – 227 – 13, obteniendo el 100%. Esto es debido a que el este material es producto del machaqueo de rocas de excavación.

En el PG-3 no establece un porcentaje mínimo de partículas fracturadas, pero menciona que los elementos machacados deben presentar dos (2) o más caras de fractura. Uno de los propósitos de este es maximizar la resistencia al corte, incrementado la fricción entre partículas. Otro propósito, es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura a los agregados usados en la construcción de capas de rodadura (INVIAS, 2013).

Para el caso particular del material ensayado, se considera que es un material que cumpliría cualquier restricción en lo que refiere al porcentaje de partículas fracturadas, debido a que todas tienen dos o más caras fracturadas, brindando una adecuada fricción, trabazón y estabilidad entre ellas.

6.5 GRANULOMETRÍA DEL RECEBO

En la Tabla 3 Tabla 7 se muestra la granulometría del recebo, determinada por tamizado según la norma INV E – 213 – 13. El peso de la muestra fue de 1 kg, como lo establece la norma mencionada.

Tabla 7. Análisis granulométrico del recebo

Tamices		Retenido				Pasa en muestra total	
No.	mm	Parcial (gr)	Porcentaje (%)	Total (gr)	Porcentaje (%)	Total (gr)	Porcentaje (%)
3/8"	9.500	0.0	0.00%	0.0	0.00%	1003.0	100.00%
4	4.750	10.9	1.09%	10.9	1.09%	990.5	98.91%
10	2.000	240.7	24.00%	251.6	25.08%	749.8	74.92%
20	0.850	237.3	23.66%	488.9	48.74%	512.5	51.26%
40	0.425	209.7	20.91%	698.6	69.65%	302.8	30.35%
60	0.250	140.2	13.98%	838.8	83.63%	162.6	16.37%
100	0.149	86.9	8.66%	925.7	92.29%	75.7	7.71%
140	0.106	47.5	4.74%	973.2	97.03%	28.2	2.97%
200	0.075	16.5	1.65%	989.7	98.67%	11.7	1.33%
Fondo		11.7	1.33%	1003.0	100.00%	0	0.00%

En la Tabla 8 se la granulometría requerida para el recebo en el PG-3, y la obtenida en el recebo de estudio.

Tabla 8. Granulometría del recebo en estudio y requisitos del PG-3

Tamices (mm)	Muestra Estudio	Requisito PG-3
9.52	100%	100%
4.75	99%	>85%
2.00	75%	-
0.85	51%	-
0.42	30%	-
0.25	16%	-
0.14	8%	-
0.10	3%	-
0.07	1%	10%-25%
Fondo	0%	-

En la anterior tabla se observa que todas las partículas del recebo en estudio pasan por el tamiz de 9.52 mm, incluso el 99% también lo hace por el de 4.75 mm, cumpliendo con el requerimiento del PG-3. Esto quiere decir que el recebo en estudio es un agregado fino. También se percibe que todo el material está entre 4.75 mm y 0.07 mm, sin embargo, el requisito del PG-3 exige que entre el 10% y el 25% pasen este último tamiz (0.07 mm o No. 200). Estas partículas son consideradas filler o material llenante, que brinda una mayor densidad al macadam. Ver Figura 14.

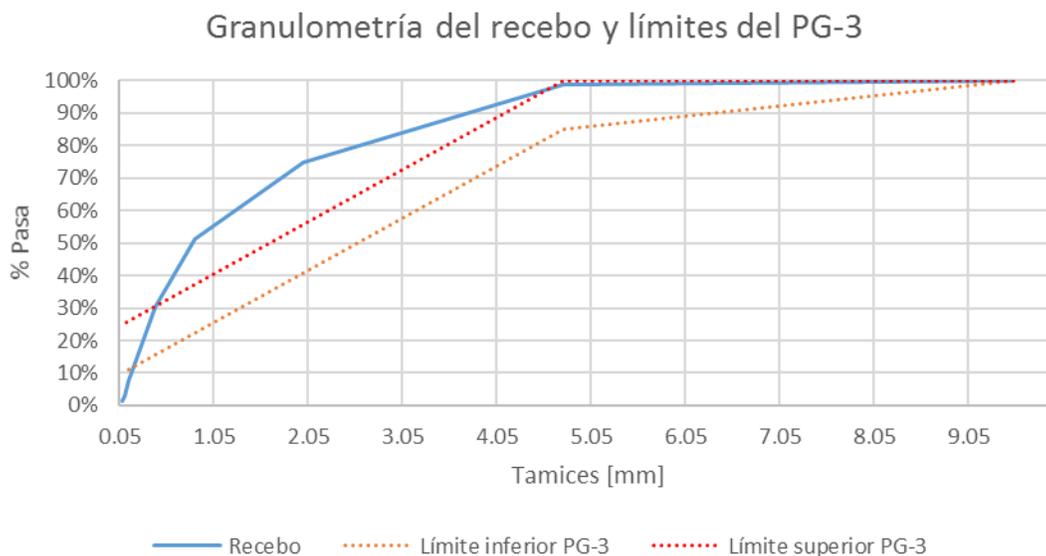


Figura 14. Granulometría del recebo y límites del PG-3

6.6 LIMITE LÍQUIDO DEL RECEBO E ÍNDICE PLÁSTICO DEL RECEBO

El ensayo de límite líquido se hizo mediante la norma INV E – 125 – 13, sin embargo, no se alcanzaron a realizar los 25 golpes en la cazuela, por tanto, se determina que el recebo no tiene límite líquido.

El ensayo para determinar el índice plástico se hizo mediante la norma INV E – 126 – 13, sin embargo, el material no permitió que se realizaran los rollos especificados, determinando que el recebo es un suelo no plástico.

Como lo menciona el Fernando Sánchez (Módulo 7: Materiales para base y subbase, 2010) el índice plástico representa el rango de *humedad* en el cual una fracción fina se encuentra en estado plástico. Para el caso del recebo en estudio, no se pudo determinar ninguno de los dos límites, líquido y plástico, debido a la naturaleza del material. Ver Figura 15. De esta manera se cumple con el requerimiento del PG-3, numeral 502.2.2.2.3, donde menciona que el recebo debe ser no plástico. El objetivo de esta condición es tener un material no deformable como soporte de las capas de rodadura, porque al ser materiales que estarán en contacto con el agua no deben transmitir deformaciones a las capas superiores.



Figura 15. Recebo en estudio

6.7 EQUIVALENTE DE ARENA, INV-133-13

El equivalente de arena es la medida numérica de la contaminación por limo o arcilla en el agregado fino, según lo determina la norma INV E - 133 – 13. Una vez realizado el ensayo, se obtuvo 3.5 en la lectura de arena y 4.2 en la lectura de arcilla, obteniendo el equivalente de arena de 83.33%.

$$EA = \frac{3.5}{4.2} * 100 = 83.33\%$$

En la Figura 16 se observa la muestra en el recipiente donde se observan las lecturas.



Figura 16. Lectura de equivalente de arena

El PG-3, numeral 502.2.2.3, determina que el equivalente de arena sea superior al 30%, de igual forma sucede con la especificación del INVIAS para bases granulares, artículo 330.

El equivalente de arena del recebo en estudio, 83.33%, es considerablemente superior al exigido por las normativas mencionadas, lo que permite asegurar que es un material de óptima calidad desde el punto de vista de su contenido de finos indeseables de naturaleza plástica.

7 DISEÑO DE PAVIMENTOS

Para realizar el diseño de pavimento se escogió el método de la PCA (Portland Cement Association), que tiene como objetivo hallar espesores mínimos de pavimento que se traduzcan en los menores costos anuales (Montejo, 1998)

En el método de la PCA los esfuerzos y deflexiones críticas se han calculado y combinado con criterios de diseño, para desarrollar tablas y graficas de diseño. Los criterios que tiene en cuenta esta metodología son: análisis de fatiga y erosión. El primero hace referencia al fenómeno que se produce debido a las repeticiones de carga generando agrietamientos en razón que los esfuerzos cortantes y de tensión superan a los admisibles (Diaz, Pacheco, Guerrero, Aroca, & Del Castillo). El segundo, análisis por erosión, considera que el pavimento falla por bombeo, por erosión del material de soporte y por escalonamiento de las juntas, presentándose la deflexión más crítica en las esquinas exteriores de la losa (Sanches, 2016).

7.1 FACTORES DE DISEÑO

El diseño por el método PCA se realiza a partir de los siguientes cuatro factores:

7.1.1 Resistencia a la flexión del módulo de rotura, MR:

Este factor se considera en el diseño por criterio de fatiga, controlando el agrietamiento bajo la acción repetida de las cargas de los vehículos pesados.

Las deformaciones que sufre un pavimento de concreto por las cargas de tránsito producen esfuerzos de compresión y tensión. Sin embargo, debido a la resistencia a compresión del concreto, los primeros esfuerzos tienen una afectación tan baja que no afecta el diseño del espesor de la losa. Por otra parte, la resistencia a la flexión del concreto si tiene una relación mucho más alta con los segundos esfuerzos, llegando a valores mayores de 0.5. Por lo descrito anteriormente el factor a tener en cuenta en el diseño de la losa de pavimento es el módulo de rotura a flexión del concreto (Montejo, 1998).

Para el diseño del pavimento de este trabajo de grado se escogió un MR de 45 kg/cm², equivalente a 4.41 MPa.

7.1.2 Resistencia de la subrasante o del conjunto subrasante - subbase (k):

La resistencia o soporte de la superficie hace referencia a la relación de la resistencia y deformación del terreno donde se apoya la losa de concreto. Se mide en términos del módulo de reacción (k), que tiene dos formas de hallarse. La primera mediante ensayo de placa directa, procedimiento complejo y costoso; y la segunda por correlaciones con otros ensayos como el CBR (Montejo, 1998).

En el presente trabajo se consideran dos superficies de apoyo de la losa de concreto, la combinación 1 es la unión de la subrasante con una capa de 30 cm de subbase de CBR 30%,

y la combinación 2, entre la misma subrasante y una capa del macadam caracterizado de 30 cm.

El material de subrasante trabajado fue el caracterizado en la tesis “Diseño de pavimento flexible por medio del software Pavement de Aashtoware y manual de uso primario” (Ceron, 2017). Un suelo compuesto compuesto por 2.22% de gravas, 96.31% de arena y 1.47% de finos, con limite liquido 45.3, limite plástico 37.02 e índice de plasticidad 8.28; y CBR 14.91% al 95% de compactación.

Por medio de la siguiente correlación, utilizada para suelos granulares (Montejo, 1998), se obtuvo el módulo resiliente de la subrasante:

$$Mr = 4326 * Ln(CBR) + 241$$

$$Mr = 4326 * Ln(14.91) + 241 = 11929 \text{ psi}$$

También se utilizó el aplicativo de la ACPA (American Concrete Pavement Association) <http://apps.acpa.org/applibrary/SubgradeResilientModulus/> para calcular, a partir del CBR, el módulo resiliente y de reacción, obteniendo los siguientes resultados

$$Mr = 12392 \text{ psi}$$

$$k = 234 \text{ psi/in}$$

Para el diseño de la **combinación 1** se procede a definir las características de la subbase a utilizar. Debido a que el tránsito establecido para el diseño (ver página 44) es tipo 1, la subbase requerida es clase C con un CBR de 30%, como se muestra en la tabla 320-2 (Figura 17) de las especificaciones técnicas del INVIAS 2013.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUB-BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones (%)	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	35	30
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	25	25
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo.	E-148	30	30	40

Figura 17. Tabla 320-2 de las especificaciones técnicas del INVIAS, requisitos para la sub-base granular. (INVIAS, 2013)

Con el valor del CBR (30%) requerido por las especificaciones del INVIAS y el ábaco de correlación expuesto en la Figura 18 – Variación del coeficiente a_3 con diferentes parámetros de la resistencia de la subbase (Montejo, 1998) se obtuvo que el módulo elástico de la subbase es 15000 Lb/pg².

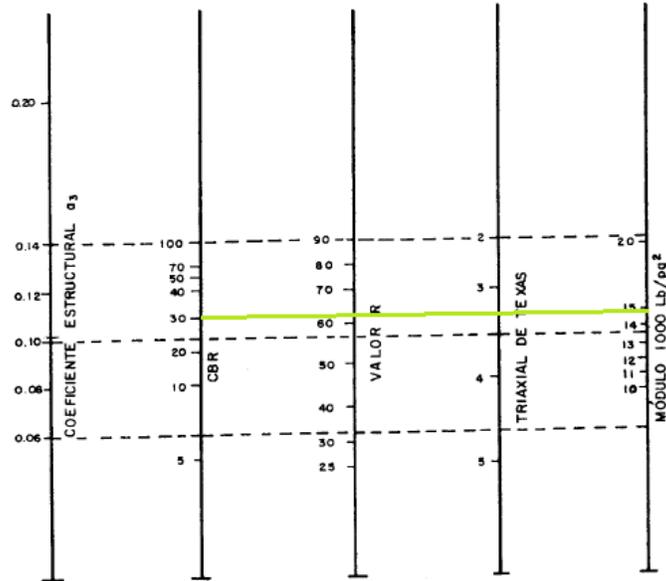


Figura 18. Variación del coeficiente a_3 con diferentes parámetros de la resistencia de la subbase (Montejo, 1998)

Una vez obtenido el módulo resiliente de la subrasante y el módulo elástico de la subbase granular se calculó el módulo de reacción combinado para la combinación 1. En la Figura 19 se entra con los dos valores mencionados y un espesor de subbase de 8.8" = 30 cm, obteniendo como resultado 600 pci.

Figura 4-4
Módulo compuesto de reacción de la subrasante

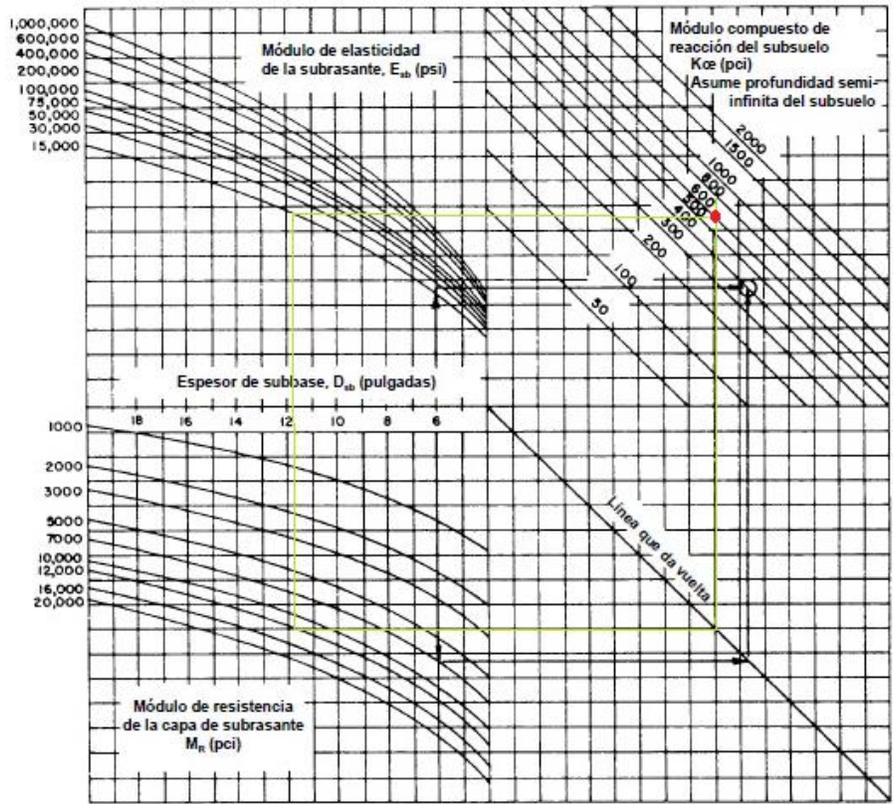


Figura 19. Módulo de reacción compuesto. Grafica 4-4 de la Guía para diseño de estructura de pavimentos (AASHTO, 1993)

Por otro lado, se calculó el módulo de reacción utilizando el aplicativo de la ACPA, y se obtuvo un valor de 580 pci. Ver Figura 20.



///STATIC K-VALUE CALCULATOR ///

STEP 1 - CALCULATE SUBGRADE STATIC K-VALUE

Resilient Modulus of Subgrade (M_{RSG}), psi: 

k-Value corresponding to the calculated M_{RSG} : **234 psi/in.**

STEP 2 - CALCULATE COMPOSITE STATIC K-VALUE

FROM THE TOP LAYER DOWN, INPUT SUBGRADE/SUBBASE DETAILS

 Layer 1 Material

Resilient Modulus of Layer (psi):

Allowable Resilient Modulus range: 15,000 - 45,000 psi

Layer Thickness (in.):

 Layer 2 Material

STEP 3 - CALCULATE COMPOSITE STATIC K-VALUE

Composite Static k-Value: **580 psi/in.**

Figura 20. Módulo de reacción combinado utilizando el aplicativo de la ACPA.

Adicional a lo anterior, utilizando la tabla 6.1 del libro “Ingeniería de pavimentos para carreteras” de Alfonso Montejo, se obtuvo un k combinado igual a 349 pci (interpolando). Ver Tabla 9.

Tabla 9. Módulo de reacción combinado según el libro “Ingeniería de pavimentos para carreteras” (Montejo, 1998)

k subrasante		Efecto de la subbase granular sobre los valores de k							
		K combinado subrasante - subbase [pci]							
MPa/m	lb/pg3	150 [mm]		200 [mm]		225 [mm]		300 [mm]	
		MPa/m	lb/pg3	MPa/m	lb/pg3	MPa/m	lb/pg3	MPa/m	lb/pg3
20	73	23	85	26	96	32	117	38	170
40	147	45	165	49	180	57	210	66	245
60	220	64	235	66	245	76	280	90	330
80	295	87	320	90	330	100	370	117	430

Para la **combinación 2** se requería saber el módulo elástico del Macadam, para así poder calcular el módulo de reacción combinado subrasante – macadam, para lo cual se recurrió a investigación de bibliografía.

En el trabajo “Determinación del módulo de reacción (k) para el conjunto de capa triturada y sub-rasante” (Acevedo & Henao, 2017) los autores hallan los módulos de reacción para tres escenarios: 1) subrasante únicamente, 2) subrasante con una capa de 20 cm de triturado, y 3) subrasante con una capa de 30 cm de triturado. La subrasante era una Grava arcillo – limosa con arena, compuesta por finos en un 23.2 %, arenas 24.06% y gravas 52.74%. Su tamaño máximo fue 1” y tuvo un CBR de 25.5%. Por otra parte, el triturado utilizado tenía una granulometría de tamaño máximo de 2” y el 80% estaba entre 2” y 1”, y el desgaste en la máquina de los ángeles fue de 21.2”.

Una vez caracterizados los materiales del trabajo de grado mencionado los autores realizaron los ensayos de placa normalizado, obteniendo los resultados de la Tabla 10.

Tabla 10. Módulos de reacción obtenidos en el trabajo “Determinación del módulo de reacción (k) para el conjunto de capa triturada y sub-rasante” (Acevedo & Henao, 2017)

Estructura	Módulo de reacción k [pci]
Subrasante	172
Subrasante + triturado 20 cm	205
Subrasante + triturado 30 cm	250

Estos resultados fueron comparados con los de la tabla 6.1 del libro “Ingeniería de pavimentos para carreteras” (Montejo, 1998), donde se realizó una interpolación para obtener datos de una subrasante con k=172 pci combinada con una subbase. En la Tabla 11 se muestran los resultados.

Tabla 11. Módulos de reacción combinado subrasante – subbase (Montejo, 1998)

K combinado subrasante - subbase [pci]				
k subrasante [pci]	Espesor [mm]			
	150	200	225	300
147	180	200	210	245
172	202	223	234	274
220	245	268	280	330

De las dos tablas anteriores se puede observar que los valores experimentales de módulo de reacción obtenidos por Acevedo y Henao para una combinación de subrasante ($k=172$ pci) y una capa de triturado de 20 y 30 cm, difieren en menos de un 10% respecto a los valores sugeridos en el libro de Alfonso Montejo, para la combinación subrasante – subbase. La escasez de arenas y finos de la capa de triturado de los primeros autores mencionados puede ser la causante de la diferencia. Agregar estos granulares mejoraría la compacidad y probablemente la capacidad de soporte del conjunto de materiales.

Adicional al análisis descrito anteriormente se analizaron los resultados obtenidos en un proyecto de infraestructura vial donde se instaló el macadam caracterizado en este trabajo de grado. La subrasante es una arena arcillosa color rojizo, con un CBR 5.7%. Con este valor se obtuvo el módulo de reacción igual a 147 pci por medio de la Figura 21.

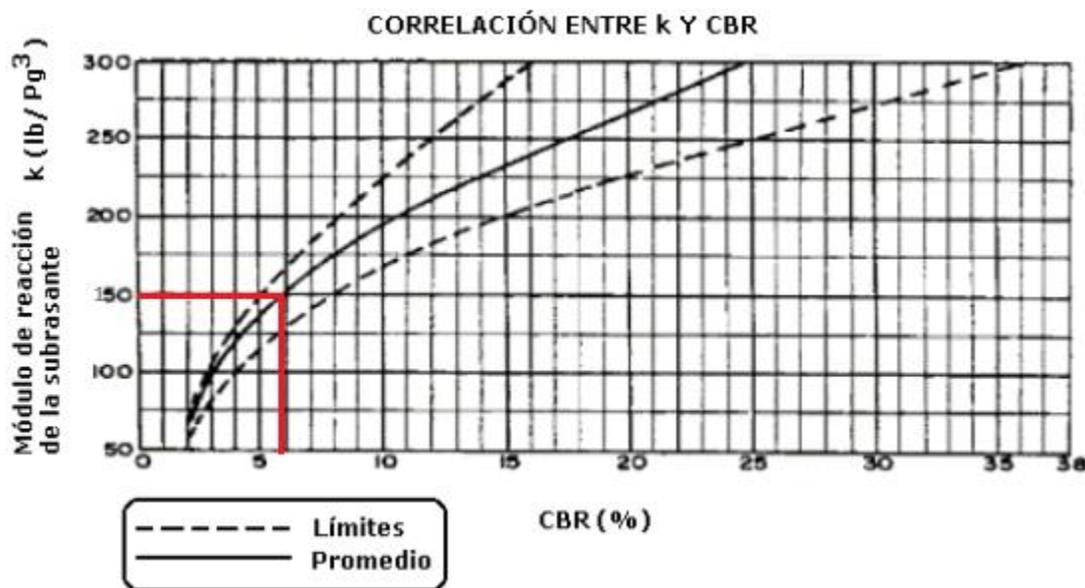


Figura 21. Correlación entre el módulo de reacción k y el CBR (Sanchez, 2010)

En la Figura 22 se muestra el resultado del módulo de reacción, obtenido mediante el ensayo de placa con carga estática (INV E-168), igual a 65.5 MPa = 239 pci.

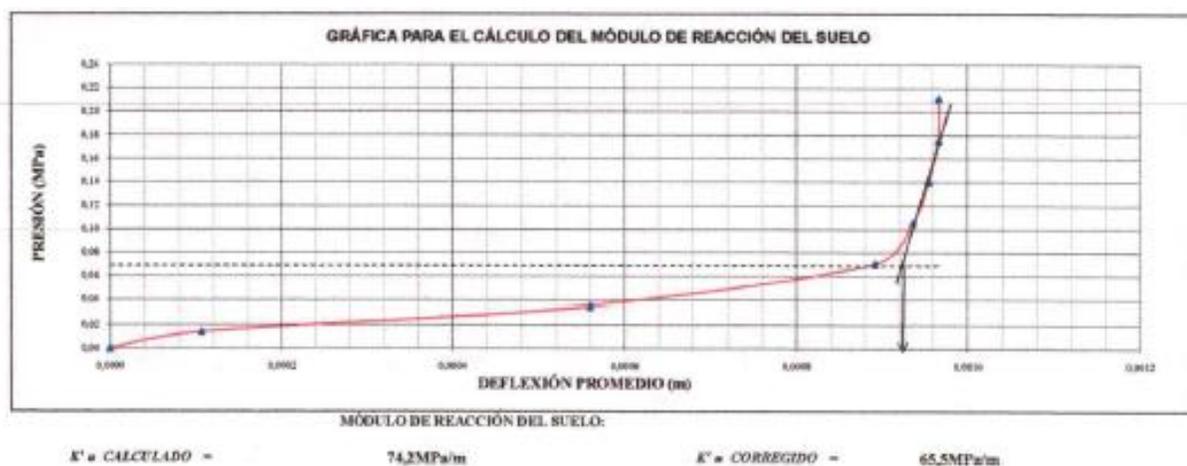


Figura 22. Grafica para el cálculo del módulo de reacción del material.

Conociendo el módulo de reacción combinado subrasante - macadam y el de la subrasante se compara con los valores de k expuestos en la tabla 6.1 del libro “Ingeniería de pavimentos para carreteras” de Alfonso Montejó, encontrando una diferencia menor al 2%.

Por lo descrito en este numeral, después de analizar varias fuentes bibliográficas y ensayos de laboratorio, se considera que el aporte del macadam es el mismo que de una subbase compactada con un CBR del 30%.

Entonces para el desarrollo de este trabajo, donde el CBR de la subrasante es 14.91% y por la Figura 21 su módulo de reacción es 230 pci, se obtiene un k combinado, subrasante – subbase o subrasante – macadam, de 342 pci , utilizando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

7.1.3 Tipos, frecuencias y magnitudes de las cargas por ejes esperadas.

El tránsito trabajado en el presente proyecto fue el del parqueadero interno de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Bucaramanga. Los datos fueron extraídos del trabajo de grado “Diseño de pavimento flexible por medio del software Pavement de Aashtoware y manual de uso primario” (Ceron, 2017). En la Tabla 12 se muestra el TPD por vehículo, y se proyecta la cantidad de vehículos comerciales (furgones, camiones, volquetas y buses) acumulados a 20 años con un incremento del 5% anual.

Tabla 12. Datos de tránsito para el diseño de pavimento

Transito diario	
Autos	2188
Furgones	3
Camiones	9
Volquetas	3
Buses	4
TPD diseño	2207
Autos + furgones + camiones + volquetas + buses	2207
Crecimiento anual	5%

Vehículos comerciales	0.86%
Veh. Comerciales en el año 1	6935
TPD diseño * %V.C * 365	
T acumulado (Vc)	229312

En la Tabla 13 se muestra la distribución de los vehículos comerciales, con su respectiva carga por eje y el cálculo de dejes esperado en el periodo de diseño para cada uno.

Tabla 13. Distribución de vehículos comerciales y repeticiones esperadas

Tipo vehículo	Peso eje [Kn]	Ejes por cada 1000 vehículos comerciales (ajustado)	Repeticiones esperadas
Buses	180	422	96770
Volquetas	155	316	72463
Camiones	85	946	216930
Furgones	75	316	72463

7.1.4 El periodo de diseño

Para el presente trabajo se considera un periodo de diseño de 20 años como lo recomienda el “Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito” (Londoño & Alvarez, 2008)”.

7.2 DISEÑO DEL PAVIMENTO

Debido a que el aporte al módulo de reacción de la subbase y el macadam es igual, y los demás factores de diseño son los mismos para ambos casos, se realizó un único procedimiento de diseño para las dos estructuras.

Adicional a lo anterior se define que no se usaran pasadores en las juntas de las losas ni bermas de concreto, debido al poco espacio que pueda haber en el lugar de construcción.

A continuación se presenta la Tabla 14, donde están todos los factores de diseño determinados.

Tabla 14. Factores de diseño

Pasadores en las juntas	No
Bermas	No
Módulo de reacción (k)	93.7 MPa/m
Módulo rotura del concreto	4.4 MPa
Periodo de diseño	20 años

La

Tabla 15 es una hoja de cálculo diseñada para la determinación del espesor adecuado de la losa de concreto, en base a los factores de diseño descritos anteriormente. A continuación se describe el procedimiento para diligenciar la

Tabla 15:

1. Primero se definió la NO existencia de juntas con pasadores Ni de bermas de concreto, datos que se anotan en la parte superior derecha de la tabla.
2. El periodo de diseño es 20 años.
3. En la parte superior izquierda se anota el espesor de tanteo de la losa, con el que se realizara la primera iteración de cálculo. En este caso se inicia con 260 mm.
4. El módulo de reacción combinado k, 93.7 MPa/m, se escribe debajo el espesor de tanteo, al igual que el módulo de rotura del concreto, 4.41 MPa.
5. Se toma un factor de seguridad de carga de 1.1 con el objetivo de tener un diseño un poco conservador.
6. La casilla número 8, esfuerzo equivalente, se diligencia por medio de la tabla 6.5 del libro del Alfonso Montejo. Ver Figura 23. Los datos de entrada de esta tabla son el espesor de la losa y el k combinado. Es necesario interpolar para obtener el resultado 1.075 MPa.

Tabla 6.5 Esfuerzo equivalente-sin berma de concreto (eje simple/eje tándem)						
Espesor de losas (m.m.)	K combinado (Mpa/m)					
	20	40	60	80	140	180
100	5.42/4.39	4.75/3.83	4.38/3.59	4.13/3.44	3.66/3.22	3.45/3.15
110	4.74/3.88	4.16/3.35	3.85/3.12	3.63/2.97	3.23/2.76	3.06/2.68
120	4.19/3.47	3.69/2.98	3.41/2.75	3.23/2.62	2.88/2.40	2.73/2.33
130	3.75/3.14	3.30/2.68	3.06/2.46	2.89/2.33	2.59/2.13	2.46/2.05
140	3.37/2.87	2.97/2.43	2.76/2.23	2.61/2.10	2.34/1.90	2.23/1.83
150	3.06/2.64	2.70/2.23	2.51/2.04	2.37/1.92	2.13/1.72	2.03/1.65
160	2.79/2.45	2.47/2.06	2.29/1.87	2.17/1.76	1.95/1.57	1.86/1.50
170	2.56/2.28	2.26/1.91	2.10/1.74	1.99/1.63	1.80/1.45	1.71/1.38
180	2.37/2.14	2.09/1.79	1.94/1.62	1.84/1.51	1.66/1.34	1.58/1.27
190	2.19/2.01	1.94/1.67	1.80/1.51	1.71/1.41	1.54/1.25	1.47/1.18
200	2.04/1.90	1.80/1.58	1.67/1.42	1.59/1.33	1.43/1.17	1.37/1.11
210	1.91/1.79	1.68/1.49	1.56/1.34	1.48/1.25	1.34/1.10	1.28/1.04
220	1.79/1.70	1.57/1.41	1.46/1.27	1.39/1.18	1.26/1.03	1.20/0.98
230	1.68/1.62	1.48/1.34	1.38/1.21	1.31/1.12	1.18/0.98	1.13/0.92
240	1.58/1.55	1.39/1.28	1.30/1.15	1.23/1.06	1.11/0.93	1.06/0.87
250	1.49/1.48	1.32/1.22	1.22/1.09	1.16/1.01	1.05/0.88	1.00/0.83
260	1.41/1.41	1.25/1.17	1.16/1.05	1.10/0.97	0.99/0.84	0.95/0.79
270	1.34/1.36	1.18/1.12	1.10/1.00	1.04/0.93	0.94/0.80	0.90/0.75
280	1.28/1.30	1.12/1.07	1.04/0.96	0.99/0.89	0.89/0.77	0.86/0.72
290	1.22/1.25	1.07/1.03	0.99/0.92	0.94/0.85	0.85/0.74	0.81/0.69
300	1.16/1.21	1.02/0.99	0.95/0.89	0.90/0.82	0.81/0.71	0.78/0.66
310	1.11/1.16	0.97/0.96	0.90/0.86	0.86/0.79	0.77/0.68	0.74/0.64
320	1.06/1.12	0.93/0.92	0.86/0.83	0.82/0.76	0.74/0.66	0.71/0.62
330	1.02/1.09	0.89/0.89	0.83/0.80	0.78/0.74	0.71/0.63	0.68/0.59
340	0.98/1.05	0.85/0.86	0.79/0.77	0.75/0.71	0.68/0.61	0.65/0.57
350	0.94/1.02	0.82/0.84	0.76/0.75	0.72/0.69	0.65/0.59	0.62/0.55

Figura 23. Esfuerzo equivalente – sin berma de concreto (Montejo, 1998).

7. La casilla número 9, factor de relación de esfuerzos, es la división del esfuerzo equivalente entre el módulo de rotura del concreto. Da como resultado 0.24.

8. Las columnas 1 y 3 son los datos de transito de la Tabla 13. La columna 2 es la multiplicación de la 1 por el factor de seguridad de carga (1.1).
9. Para realizar el análisis por fatiga, en la columna 4 se anotan las repeticiones admisibles para cada carga según el factor de relación de esfuerzos. Figura 24. En la columna 5 se calcula el porcentaje de fatiga, dividiendo las repeticiones esperadas entre las admisibles.

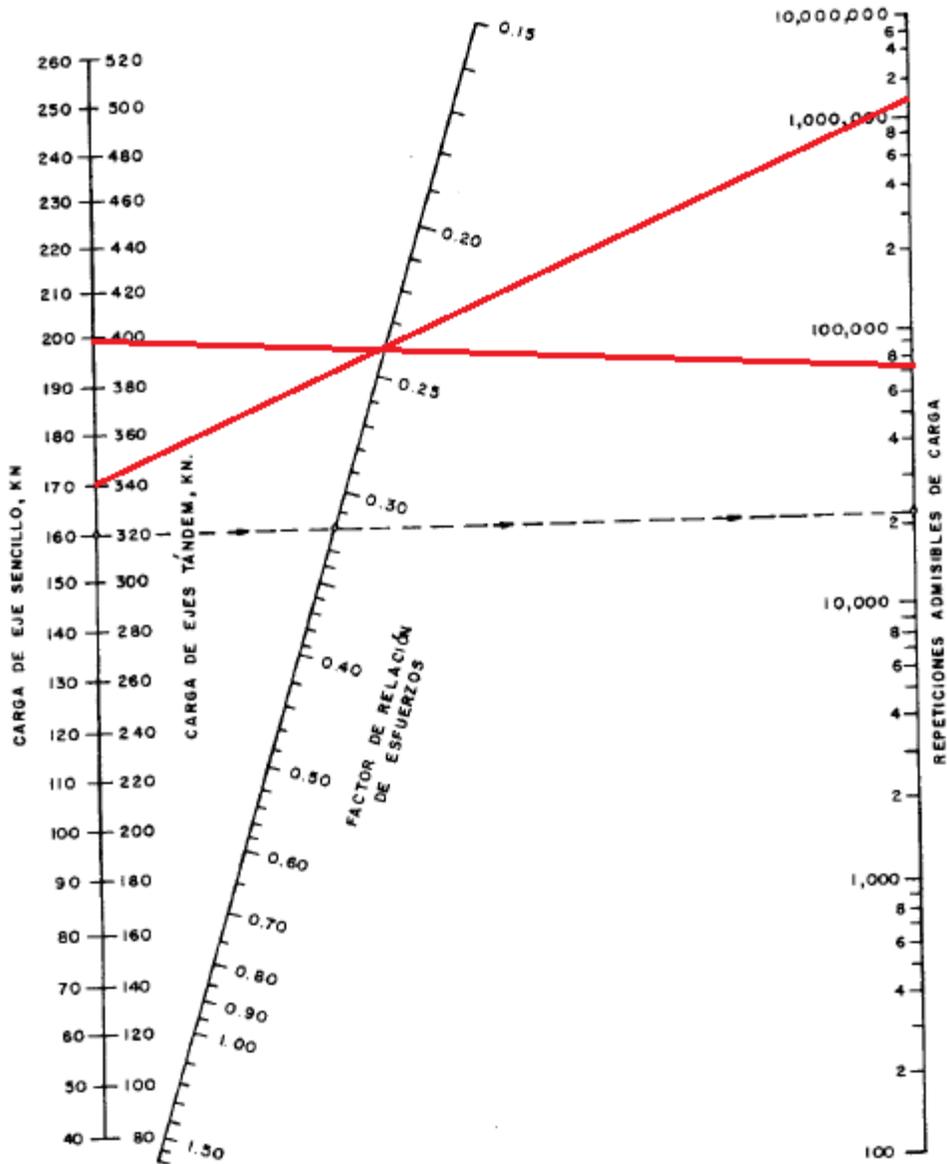


Figura 24. Análisis de fatiga – Cargas admisibles con base en el factor de relación de esfuerzos (con y sin berma) (Montejo, 1998).

10. En la casilla número 10, factor de erosión, se anota el valor correspondiente de la tabla 6.8 del libro de Alfonso Montejo, según el espesor de la losa y el k combinado. Ver Figura 25. Se interpola para obtener el 2.68.

Tabla 6.8 Factores de erosión Trabazón de agregados, sin bermas de concreto (eje simple/eje tándem)						
Espesor de losa (mm)	K Combinado (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
100	3.94/4.00	3.92/3.93	3.90/3.90	3.88/3.88	3.84/3.84	3.80/3.82
110	3.82/3.90	3.79/3.82	3.78/3.79	3.76/3.76	3.72/3.72	3.69/3.70
120	3.71/3.81	3.68/3.73	3.67/3.69	3.65/3.66	3.62/3.62	3.59/3.59
130	3.61/3.73	3.58/3.65	3.56/3.60	3.55/3.57	3.52/3.52	3.50/3.49
140	3.52/3.66	3.49/3.57	3.47/3.52	3.46/3.49	3.43/3.43	3.41/3.41
150	3.43/3.59	3.40/3.50	3.38/3.45	3.37/3.42	3.34/3.36	3.32/3.33
160	3.35/3.53	3.32/3.43	3.30/3.38	3.29/3.35	3.26/3.28	3.24/3.26
170	3.28/3.48	3.24/3.37	3.22/3.32	3.21/3.28	3.18/3.22	3.17/3.19
180	3.21/3.42	3.17/3.32	3.15/3.26	3.14/3.23	3.11/3.16	3.10/3.13
190	3.15/3.37	3.11/3.27	3.08/3.21	3.07/3.17	3.04/3.10	3.03/3.07
200	3.09/3.33	3.04/3.22	3.02/3.16	3.01/3.12	2.98/3.05	2.96/3.01
210	3.04/3.28	2.99/3.17	2.96/3.11	2.95/3.07	2.92/3.00	2.90/2.96
220	2.98/3.24	2.93/3.13	2.90/3.07	2.89/3.03	2.86/2.95	2.85/2.92
230	2.93/3.20	2.88/3.09	2.85/3.03	2.83/2.98	2.80/2.91	2.79/2.87
240	2.89/3.16	2.83/3.05	2.80/2.99	2.78/2.94	2.75/2.86	2.74/2.83
250	2.84/3.13	2.78/3.01	2.75/2.95	2.73/2.91	2.70/2.82	2.69/2.79
260	2.80/3.09	2.73/2.98	2.70/2.91	2.69/2.87	2.65/2.79	2.64/2.75
270	2.76/3.06	2.69/2.94	2.66/2.88	2.64/2.83	2.61/2.75	2.59/2.71
280	2.72/3.03	2.65/2.91	2.62/2.84	2.60/2.80	2.56/2.71	2.55/2.68
290	2.68/3.00	2.61/2.88	2.58/2.81	2.56/2.77	2.52/2.68	2.50/2.64
300	2.65/2.97	2.57/2.85	2.54/2.78	2.52/2.74	2.48/2.65	2.46/2.61
310	2.61/2.94	2.54/2.82	2.50/2.75	2.48/2.71	2.44/2.62	2.42/2.58
320	2.58/2.91	2.50/2.79	2.47/2.72	2.44/2.68	2.40/2.59	2.38/2.55
330	2.55/2.89	2.47/2.77	2.43/2.70	2.41/2.65	2.36/2.56	2.35/2.52
340	2.52/2.86	2.44/2.74	2.40/2.67	2.37/2.62	2.33/2.53	2.31/2.49
350	2.49/2.84	2.41/2.71	2.37/2.65	2.34/2.60	2.29/2.51	2.28/2.47

Figura 25. Factores de erosión. Trabazón de agregados y sin bermas (Montejo, 1998).

11. Para realizar el análisis por erosión, en la columna 6 se anotan las repeticiones admisibles para cada carga según el factor de relación de erosión Figura 24. En la columna 7 se calcula el porcentaje de daño, dividiendo las repeticiones esperadas entre las admisibles.

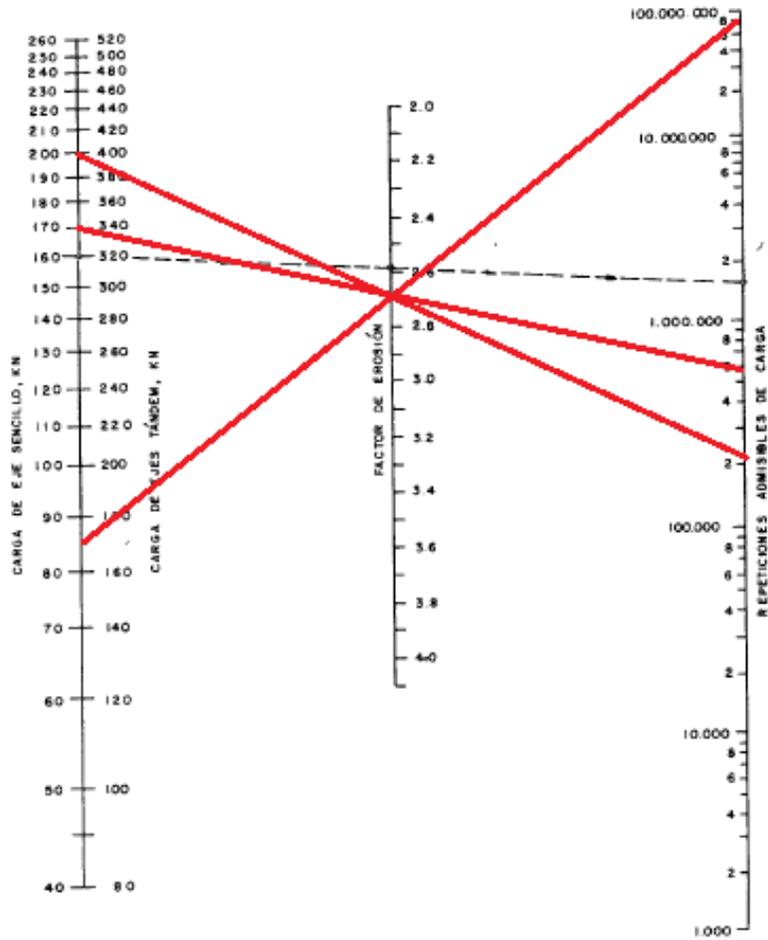


Figura 26. Cargas admisibles son base en el factor de erosión (Sin berma) (Montejo, 1998).

Tabla 15. Cálculo del espesor del pavimento rígido

Cálculo del espesor del pavimento rígido

Espesor de tanteo [mm]	260
K combinado [MPa/m]	93.7
Módulo rotura, MR [Mpa]	4.41
Factor seguridad carga	1.1

Juntas con pasadores [SÍ/NO]	NO
Berma de concreto [SÍ/NO]	NO
Período de diseño [años]	20

Carga por eje KN	Multiplicado por FSC	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones admisibles	Porcentaje de fatiga (%)	Repeticiones admisibles	Porcentaje de daño (%)
1	2	3	4	5	6	7
8. Esfuerzo equivalente [MPa]			1.075		10. Factor de erosión	2.68
9. Factor de relación de esfuerzos			0.24			

Ejes sencillos

180	198	48385	70000	69.12	220000	21.99
155	170.5	36231	1500000	2.42	600000	6.04
85	93.5	108465	ilimitado	Sin daño	40000000	0.14
75	82.5	36231	ilimitado	Sin daño	ilimitado	Sin daño
Total [%]				71.54	Total [%]	28.17

12. Finalmente se hace la sumatoria de la columna 5, porcentaje de fatiga; y por otro lado la columna 7, porcentaje de daño por erosión. Los resultados deben ser menores a 100% para considerar que el espesor de la losa dispuesto es adecuado.

Con el objetivo de verificar que la losa no estaba sobre dimensionada se realizó el mismo procedimiento anterior suponiendo un espesor de 250 mm, pero el daño por fatiga fue superior al 100%.

En la Figura 27 se muestra el esquema del diseño de la estructura del pavimento rígido diseñado.

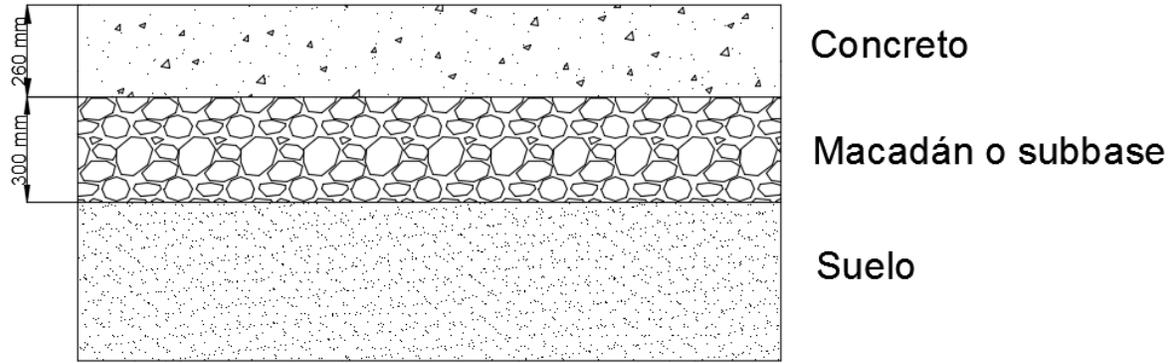


Figura 27. Estructura del pavimento rígido diseñado

8 ANÁLISIS FINANCIERO

A continuación, se realiza un análisis financiero de la producción y costes asociados con referencia al material: subbase granular, base granular y macadam.

Para comenzar con el análisis económico, en la siguiente Tabla 16. se muestran los costos de la maquinaria para el proceso de trituración de rocas.

Tabla 16. Costo de equipos de trituración

EQUIPOS TRITURACION	COSTO	MES EQUIPOS
Primaria Mandíbulas	\$	83.000.000
Secundaria Impactor	\$	56.525.000
Clasificadora	\$	48.450.000
Cargadora	\$	36.960.000
COSTO TOTAL MES	\$	224.935.000

SUBBASE

En la Tabla 17 se muestra el costo de producción de la subbase hasta su extensión y compactación.

Tabla 17. Costo de producción de la subbase, extendida y compactada.

MATERIAL DE CANTERA ALTO DE GUACA			
SUBBASE GRANULAR			
DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO	COSTO
Proyecto EIA	1	\$ 8.125	\$ 8.125
MATERIAL (canon m3)	1	\$ 4.641	\$ 4.641
Máquina trituradora con rendimiento aprox 50%	1	\$ 17.325	\$ 17.325
Cargue	1	\$ 1.500	\$ 1.500
Transporte	1	\$ 16.549	\$ 16.549
Extendido y compactado	1	\$ 21.042	\$ 21.042
		TOTAL	\$ 69.182

La comparación entre el valor de venta y coste se muestra a continuación en la Tabla 18. Utilidad de la subbase.

Tabla 18. Utilidad de la subbase.

SUBBASE GRANULAR			
DESCRIPCION	VALOR VENTA	VALOR COSTO	K UTILIDAD
SUBBASE GRANULAR	\$ 186.508	\$ 69.182	2,69

COSTE BASE GRANULAR

En la Tabla 19 se muestra el costo de producción de la base hasta su extensión y compactación.

Tabla 19. Costo de producción de la base, extendida y compactada.

MATERIAL DE CANTERA ALTO DE GUACA			
BASE GRANULAR			
DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO	COSTO
Proyecto y otros	1	\$ 8.125	\$ 8.125
MATERIAL (canon m3)	1	\$ 4.641	\$ 4.641
Máquina trituradora con rendimiento aproximado 40%	1	\$ 21.301	\$ 21.301
cargue	1	\$ 1.500	\$ 1.500
Transporte	1	\$ 16.549	\$ 16.549
Extendido y compactado	1	\$ 21.042	\$ 21.042
		TOTAL	\$ 73.158

La comparación entre el valor de venta y costo se muestra a continuación en la Tabla 20. Utilidad de la base granular.

Tabla 20. Utilidad de base

BASE GRANULAR			
DESCRIPCION	VALOR VENTA	VALOR COSTO	K UTILIDAD
BASE GRANULAR	\$ 196.651	\$ 73.158	2,69

MACADAM

En la Tabla 21 se muestra el costo de producción del macadam hasta su extensión y compactación.

Tabla 21. Costo de producción del macadam, extendido y compactado.

MATERIAL DE CANTERA ALTO DE GUACA			
MACADAM			
DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO	COSTO
Proyecto y otros	1	\$ 8.125	\$ 8.125
Excavación material común	1	\$ 6.609	\$ 6.609
cargue	1	\$ 1.500	\$ 1.500
Transporte	1	\$ 16.549	\$ 16.549
Extendido y compactado	1	\$ 21.042	\$ 21.042
		TOTAL	\$ 53.825

La comparación entre el valor de venta y costo se muestra continuación en la Tabla 22. Utilidad del macadam.

Tabla 22. Utilidad del macadam

MACADAM			
DESCRIPCION	VALOR VENTA	VALOR COSTO	K UTILIDAD
MACADAM SIN EXTENDIDO	\$196.651	\$ 32.783	5,9
ARENA (RECEBO)	\$ 25.000	\$ 9.500	2,63
COSTO TOTAL		\$ 42.283	

El costo asociado al macadam proviene del estudio del material de trituración, así mismo para obtener el recebo como material se obtiene de la generación de trituración de rocas provenientes de la excavación en roca y cambiando la malla para la obtención de este fino. Por tanto, el costo asociado es bajo, debido a que se toma de las excavaciones en roca realizadas y se asume como coste el transporte de este material y su trituración.

Análisis Financiero

En la Tabla 23 y Tabla 24 se muestran los costos de producción de los materiales en planta y los cotizados en Pescadero, zona cercana a Bucaramanga. Se observa que el precio más bajo de los granulares a instalar sobre la subrasante es el del macadam.

Tabla 23 Costo de los materiales (únicamente suministro)

MATERIAL PAVIMENTO				
DESCRIPCION	MACADAM	RECEBO	SUBBASE	BASE
COSTO SIN EXTENDIDO	\$32.783	\$9.500	\$48.143	\$52.116

Tabla 24. Costo de materiales en canteras de la zona de Bucaramanga

MATERIAL CANTERAS BUCARAMANGA				
DESCRIPCION	SUBBASE	BASE	ARENA	
Costo material m3	\$ 45.600	\$ 55.000	\$ 27.370	

La producción del material macadam y recebo tiene un coste sin extendido equivalente a \$42.283 en comparación con un material comprado en cantera de \$45.600 obteniendo así una diferencia de \$3,317 pesos MCOP por m3 de material.

Esto es una diferencia representativa puesto se podría implementar a un menor costo un material con propiedades similares a la subbase de CBR 30%, generando un ahorro significativo en costos de operación.

9 CONCLUSIONES

- La granulometría del agregado grueso del macadam caracterizado es prácticamente similar a la M2 del PG-3, únicamente difieren en un 2% en los tamices de 63 mm y 37.5 mm.
- El agregado grueso del macadán caracterizado cumple con los requerimientos de granulometría y resistencia a la degradación propuesta por el PG-3. Además, los índices de aplanamiento y alargamiento, y el porcentaje de partículas fracturadas en agregado grueso están dentro de los límites establecidos por las especificaciones del INVIAS de la base granular.
- La granulometría del recebo del macadán caracterizado cumple prácticamente con la exigida en el PG-3, la diferencia es un 9% en el tamiz de 0.07 mm (finos llenantes)
- El recebo es un material no plástico y no tiene límite líquido, cumpliendo con lo requerido por el PG-3. De igual forma sucede con el equivalente de arena, el cual es de 83.33%. Lo anterior garantiza que es un material no deformable con el agua, de buenas prestaciones para su solicitud.
- Los resultados obtenidos en la tesis (Determinación del módulo de reacción (k) para el conjunto de capa triturada y subrasante) y en el proyecto de infraestructura vial de módulo de reacción combinado, mediante el ensayo de placa directa, están muy bien relacionados con la tabla 6.1 del libro de Alfonso Montejo. Las variaciones de los resultados fueron 10% y 2% respectivamente.
- El macadam caracterizado en este proyecto y la subbase con CBR 30% tienen el mismo módulo de elasticidad, generando un valor igual de módulo de reacción combinado con el suelo. Es por esto que el espesor de la losa de concreto para el escenario planteado es de 26 cm.
- La producción del macadam en obra representa un ahorro por m³ de \$3,317 pesos MCOP con respecto a la subbase de producción de una cantera específica. Obteniendo como resultado que el material de macadam genera una reducción en costos de operación y producción significativamente.

10 RECOMENDACIONES

- Debido a la falta de normativa colombiana para el uso de materiales, en este caso del macadam, se recomienda adoptar criterios de otras especificaciones al medio de nuestro país, apoyados en sus guías y profesionales con experiencia en los respectivos procedimientos.
- Es importante realizar un análisis técnico y económico exhaustivo del uso de diferentes materiales y procedimientos para tomar la mejor decisión en cada proyecto en particular.
- Establecer relaciones entre universidades, centros de investigación y las entidades gestoras de proyectos y contratistas, para que basados en la experiencia de la industria y académica se busquen soluciones optimas desde el punto de vista técnico y económico, para proyectos particulares.

11 NUEVAS PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN

- Basados en ensayos de placa y CBR establecer relaciones con el módulo de reacción para diferentes tipos de suelos colombianos.
- Establecer relaciones entre el tipo de suelo, capa granular, su espesor, y el módulo de reacción combinado.
- Para futuras investigaciones se puede exponer una comparación del material macadam bajo diversas combinaciones de subrasante que permitan observar la caracterización de cada subrasante y el desarrollo de sus resultados; para conocer así los límites de trabajo del material macadam en cada subrasante específica.
- Una vez caracterizado nuevos materiales y procedimientos, es importante estandarizarlos, con el objetivo de garantizar su adecuado uso.
- Colombia es un país que presenta la posibilidad de encontrar en diversas zonas materiales competentes que puedan ser utilizados para el desarrollo de actividades de infraestructura vial, por tanto, se recomienda un estudio donde se obtenga de manera cartográfica zonas de estudio para futuros materiales y su incidencia en las regiones encontradas, obteniendo así una base de datos geológicos de materiales competentes clasificados para sus posibles actividades.

12 BIBLIOGRAFIA

- AASHTO. (1993). *Guía para diseño de estructuras de pavimento*. Washington.
- Acevedo, C., & Henao, L. (2017). *Determinación del módulo de reacción (k) para el conjunto de capa triturada y subrasante*. Cartagena de Indias D.T y C.
- Bañón, L. (2002). *Manual de carreteras. Volumen II construcción y mantenimiento*.
- Ceron, L. (2017). *Diseño de pavimento flexible por medio del software Pavement de Aashtoware y manual de uso primario*. Bucaramanga.
- Dal-Re, R. (1996). *Caminos rurales proyecto y construcción*.
- Diaz, J., Pacheco, I., Guerrero, E., Aroca, Y., & Del Castillo, C. (s.f.). *SCRIBD*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/313743500/Fatiga-en-Pavimentos>
- Gomez, J., & Almanza, M. (2015). *Compilando la geología de Colombia: Una Visión a 2015*. Bogotá.
- INVIAS. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. Bogotá.
- INVIAS. (2013). *Manual de ensayos de normas para materiales de carreteras*. Bogotá.
- Londoño, C. (2004). *Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto*.
- Londoño, C., & Alvarez, J. (2008). *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. Medellín.
- Ministerio de fomento de España. (2002).
- Ministerio de Fomento de España. (2002). *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*. Madrid: Ediciones Liteam.
- Montejo, A. (1998). *INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Sanchez, F. (2016). **MÓDULO 13: DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS PARA CALLES Y CARRETERAS**. Bogotá, Colombia.
- Sanchez, F. (2010). **Módulo 7: Materiales para base y subbase**. Bogotá.

13 ANEXOS

13.1 GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO

OBJETIVO: COMPARACIÓN ENTRE UN DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO CONVENCIONAL Y UNO UTILIZANDO MACADAM COMO ESTRUCTURA DE SOPORTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS GRUESO Y FINO

INV E - 213 - 13

Tamices		Retenido				Pasa en muestra total	
Pulgadas	mm	Parcial (gr)	Porcentaje (%)	Total (gr)	Porcentaje (%)	Total (gr)	Porcentaje (%)
3	75	0	0.00%	0	0.00%	60000	100.00%
2.5	63	6660	11.10%	6660	11.10%	53340	88.90%
2	50	21460	35.77%	28120	46.87%	31880	53.13%
1.5	37.5	24860	41.43%	52980	88.30%	7020	11.70%
1	25	6840	11.40%	59820	99.70%	180	0.30%
0.75	19	180	0.30%	60000	100.00%	0	0.00%

Tamaño de la muestra (gr) 60000

Módulo de finura 0.53%

13.2 DESGASTE EN MÁQUINA DE LOS ÁNGELES DEL AGREGADO GRUESO

Desgaste en máquina de los ángeles (INV E – 219 – 13)

Muestra según granulometría

Tabla 219 - 1. Granulometrías de las muestras de ensayo

TAMAÑO DEL TAMIZ		MASA DE LAS FRACCIONES, g		
PASA	RETIENE	GRANULOMETRÍAS		
		1	2	3
75 mm (3")	63 mm (2½")	2500 ± 50	5000 ± 50	5000 ± 25
63 mm (2½")	50 mm (2")			
50 mm (2")	37.5 mm (1½")		5000 ± 25	5000 ± 25
37.5 mm (1½")	25 mm (1")		5000 ± 25	5000 ± 25
25 mm (1")	19 mm (¾")		5000 ± 25	5000 ± 25
Total		10 000 ± 100	10 000 ± 75	10 000 ± 50

Se utilizaron 12 esferas

P1 (muestra seca antes de ensayo) [g] 10000

P2 (muestra previo lavado con el tamiz No. 12) [g] 6682

% pérdidas 33.18%

13.3 PARTÍCULAS FRACTURADAS DEL AGREGADO GRUESO

Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso (INV E-227-13)

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL mm (pulgadas)	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA g (lb aprox.)
9.50 (3/8)	200 (0.5)
12.5 (1/2)	500 (1.0)
19.0 (3/4)	1500 (3.0)
25.0 (1)	3000 (6.5)
37.5 (1 1/2)	7500 (16.5)
50.0 (2)	15 000 (33.0)
63.0 (2 1/2)	30 000 (66.0)
75.0 (3)	60 000 (132.0)
90.0 (3 1/2)	90 000 (198.0)

F (masa de partículas fracturadas) [g]	30000
N (masa de partículas no fracturadas) [g]	0
P	100%

13.4 APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO DEL AGREGADO GRUESO

Índice de aplanamiento y alargamiento (INV E 230-13)

Tamices	Retenido				
Pulgadas	Parcial (gr)	Aplanadas	Indice aplanam	Alargadas	Indice alargamiento
3	0				
2.5	6660				
2	21460	1460	6.80%		
1.5	24860	3820	15.37%	900	3.62%
1	6840	2860	41.81%	0	0.00%
0.75	180	0	0.00%	0	0.00%
			15.26%	2.82%	

13.5 GRANULOMETRÍA DEL RECEBO

PROYECTO: COMPARACIÓN ENTRE UN DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO CONVENCIONAL Y UNO UTILIZANDO MACADAM COMO ESTRUCTURA DE SOPORTE

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS GRUESO Y FINO

INV E - 213 - 13

No	Tamices		Retenido				Pasa en muestra total	
	mm		Parcial (gr)	Porcentaje (%)	Total (gr)	Porcentaje (%)	Total (gr)	Porcentaje (%)
3/8"	9.5		0	0.00%	0	0.00%	1003	100.00%
	4	4.750	10.9	1.09%	10.9	1.09%	992.1	98.91%
	10	2.000	240.7	24.00%	251.6	25.08%	751.4	74.92%
	20	0.850	237.3	23.66%	488.9	48.74%	514.1	51.26%
	40	0.425	209.7	20.91%	698.6	69.65%	304.4	30.35%
	60	0.250	140.2	13.98%	838.8	83.63%	164.2	16.37%
	100	0.149	86.9	8.66%	925.7	92.29%	77.3	7.71%
	140	0.106	47.5	4.74%	973.2	97.03%	29.8	2.97%
	200	0.075	16.5	1.65%	989.7	98.67%	13.3	1.33%
Fondo			13.3	1.33%	1003	100.00%	0	0.00%

13.6 EQUIVALENTE DE ARENA Y LÍMITES LIQUIDO Y PLÁSTICO

Tamaño de la muestra (gr) 1003

Equivalente de arena (INV E-13) 83.33% (3.5/4.2)

Límite líquido (INV E -125-13) No se alcanzan a realizar los 25 golpes en la cazuela, por tanto no tiene límite líquido

Límite plástico (INV E-126-13) No se pueden realizar los rollos especificados en la norma, por tanto es un suelo no plástico, NP.